

Microbios del rumen

Granjero Jones: ¿Sabes por qué las vacas pueden comer hierba y no podemos?



R John Wallace

Instituto Rowett, Universidad de Aberdeen, Ashgrove Road West, Aberdeen, Reino Unido

El rumen

Historia

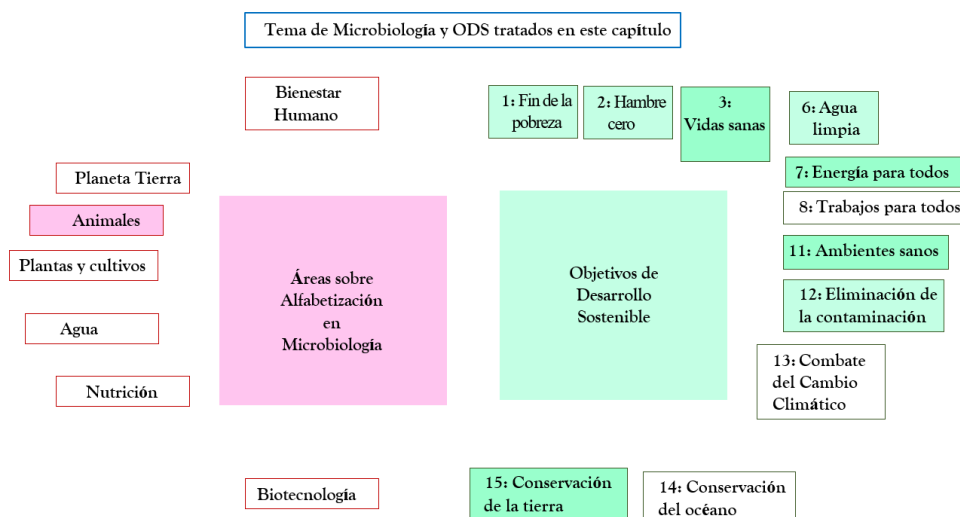
El ganado, las ovejas y las cabras pertenecen a una clase de mamíferos herbívoros que poseen una estructura intestinal que les permite crecer y producir leche mientras comen materiales fibrosos como la hierba. El primer estómago de estos animales es un gran saco llamado reticulo-ruma, o rumen para abreviar, y los animales se conocen como rumiantes. La digestión en el rumen se lleva a cabo completamente por sus microorganismos residentes, que descomponen la fibra vegetal para formar ácidos grasos volátiles (VFA).

El VFA se absorbe a través de la pared del rumen, luego se transportan en la sangre a tejidos y órganos que usan el VFA como fuente de energía y para formar glucosa y proteínas, que respaldan el crecimiento y la producción de leche. Los microorganismos transmiten el tracto digestivo para ser digeridos ellos mismos, proporcionando más nutrientes al animal huésped. Por lo tanto, los rumiantes pueden producir alimentos edibles humanos a partir de pastos y terrenos áridos, como tierras altas. De hecho, los rumiantes producen, en carne y productos lácteos, los alimentos básicos de muchas sociedades humanas en todo el mundo. Sin embargo, este beneficio viene con un costo. Los rumiantes tienen varios problemas ambientales y de salud relacionados con los objetivos de desarrollo sostenible. Un producto final natural de la fermentación ruminal es el metano. El metano es un potente gas de efecto invernadero. Además, los rumiantes producen mucha orina y heces ricas en nitrógeno. Esto puede conducir a la contaminación de la tierra y las vías fluviales. Las carnes y la leche de rumiantes son altamente nutritivos, pero existen preocupaciones de que el consumo excesivo de estos productos por parte de los humanos puede conducir a problemas de salud.

El contexto de la microbiología y la sociedad

La microbiología: el microbioma ruminal, digestión de fibra en el rumen, formación de metano, emisiones de nitrógeno, disfunción ruminal, el intestino ruminante y la infección humana, promotores de crecimiento antimicrobiano.

Otro contexto social: productos de rumiantes y salud/enfermedad humana, calentamiento global, contaminación por tierra y aguas subterráneas, sociedades dependientes de rumiantes, alimentara la población humana global, resistencia a los antibióticos, escasez de agua, biotecnología, combustible de desechos de animales.



El rumen: la microbiología

1. ***El rumen contiene un gran número de diversos microorganismos.*** El rumen comprende hasta el 20% de todo el peso corporal de ganado y ovejas. Es el primer "estómago", seguido por el Omaso, el Abomaso, el intestino delgado y el intestino grueso. La biomasa contenida en el rumen está compuesta por alimentos ingeridos, como hierba, y una gran densidad y diversa variedad de microorganismos. El microbioma contiene grandes microorganismos como protozoos (también conocidos como protistas) y hongos, más pequeños como bacterias y arqueas, y pequeños virus que infectan las bacterias y probablemente también los otros microorganismos. Juntos, descomponen las moléculas grandes que forman la fibra vegetal (celulosa, hemicelulosa y pectina principalmente) a moléculas mucho más pequeñas, principalmente los ácidos grasos volátiles (VFA). El VFA le da al contenido del rumen un olor característico, una mezcla de ácidos acéticos, propiónicos y butíricos como componentes principales. VFA se absorbe rápidamente a través de la pared del rumen hasta el torrente sanguíneo, donde se transportan a otras partes del cuerpo para ser utilizados para la energía, la síntesis de azúcar y la síntesis de proteínas. VFA son los principales nutrientes para el crecimiento y el metabolismo por el animal huésped. Se produce un gas abundante, principalmente CO₂ y metano (CH₄). Los rumiantes han desarrollado un mecanismo anatómico para deshacerse de los gases a través de la boca y regurgitar los alimentos para masticar aún más antes de tragarlo nuevamente. Esto ayuda a descomponer el material vegetal físicamente, para exponer mayores áreas de superficie al ataque microbiano. La fermentación de los materiales vegetales proporciona nutrientes a los microorganismos, que crecen muy bien a pesar de que el oxígeno está ausente. Finalmente, fluyen a través del Omaso, donde se absorbe agua que acompaña se absorbe, luego al Abomaso, que es un estómago gástrico similar al humano, excepto que funciona a un pH más alto de 3 o 4. La digestión de los microorganismos en el Abomaso proporciona más nutrientes al huésped.

2. ***Microorganismos en el rumen desglose la fibra vegetal.*** Los pastos consisten en plantas como la hierba que contienen polímeros que proporcionan resistencia estructural. El principal de estos es la celulosa, un polímero de unidades de glucosa unidas por β -1,4 enlaces. El almidón, el carbohidrato principal en el pan y las papas, es de manera similar un polímero de glucosa, pero en el almidón los enlaces son α -1,4 enlaces. Nosotros y otros mamíferos poseemos las enzimas necesarias para descomponer los α -1,4 pero no los enlaces β -1,4. Solo los microorganismos pueden descomponer el polímero de celulosa. Los microorganismos en el rumen hacen eso en nombre del animal anfitrión. Quizás sea sorprendente que sea solo una pequeña proporción del microbiota ruminal total que es realmente celulolítica (digestores de celulosa). La gran mayoría de la comunidad son digestores secundarios, que desglosan aún más los productos de los digestores principales a productos más pequeños como el VFA. La digestión de la fibra vegetal es un proceso difícil incluso para las mejores especies celulolíticas, y emplean sistemas enzimáticos muy complejos para hacerlo. Algunos protozoos (también conocidos como protistas) son celulolíticos, al igual que algunas bacterias muy importantes, y todos los hongos anaeróbicos parecen ser celulolíticos. Los hongos tienen sistemas celulolíticos extraordinariamente activos que podrían explotarse para su uso en la producción de biocombustibles.

3. ***El metano es una consecuencia natural de la actividad microbiana anaeróbica.*** Debido a que no hay oxígeno en el rumen, las bacterias, los protozoos y los hongos producen hidrógeno y dióxido de carbono en lugar de agua y dióxido de carbono como lo hacemos por respiración. El metano se forma en abundantes cantidades del hidrógeno y parte del dióxido de carbono, hasta 500 L por día en lácteos vacas - por la comunidad microbiana rumen. Es el más antiguo, en términos evolutivos, de los microbios que llevan a cabo metanogénesis, a saber, las arqueas. Si bien la metanogénesis es un medio metabólicamente elegante para deshacerse de los equivalentes reductores donde el oxígeno no está disponible, el metano producido por los rumiantes presenta

problemas ambientales globales. Es un gas de efecto invernadero (GEI), 28 veces más potente que el dióxido de carbono, y el impacto de las emisiones de metano de los rumiantes tiene implicaciones significativas para el cambio climático. Como indicador aproximado, los rumiantes tienen aproximadamente el mismo impacto en el calentamiento global que la industria de las aerolíneas. Una vaca emite los mismos equivalentes de GEI que las emisiones de dióxido de carbono de un automóvil. Los investigadores están trabajando en formas de reducir las emisiones de metano ruminal por medios dietéticos y genéticos. Parece de los resultados recientes que las emisiones de metano se pueden predecir a partir de la composición del microbioma ruminal, que en el giro depende de la genética del animal huésped. Por lo tanto, puede ser posible emprender un programa de reproducción, guiado por la composición ruminal del microbioma, generar rumiantes que producen mucho menos metano.

4. **Emisiones urinarias y fecales ricas en nitrógeno.** Debido a que el rumen evolucionó para permitir que los animales se acomoden y se beneficien del lento proceso de descomposición de la fibra, esto significa que otros componentes de los materiales vegetales ingeridos están expuestos al ataque microbiano por más tiempo de lo ideal. La proteína se descompone muchas veces más rápidamente que la celulosa. La N de la proteína dietética se utiliza, por lo tanto, y mucho se excreta, principalmente en la orina. La excreta rica en nitrógeno puede provocar vías fluviales contaminadas y la producción de óxido nitroso, un GEI aproximadamente 10 veces más potente que el metano. Algunos resultados de la investigación han ayudado a mitigar el problema, pero las emisiones de N del ganado en particular siguen siendo un problema ambiental difícil para la producción de ganado de rumiantes.

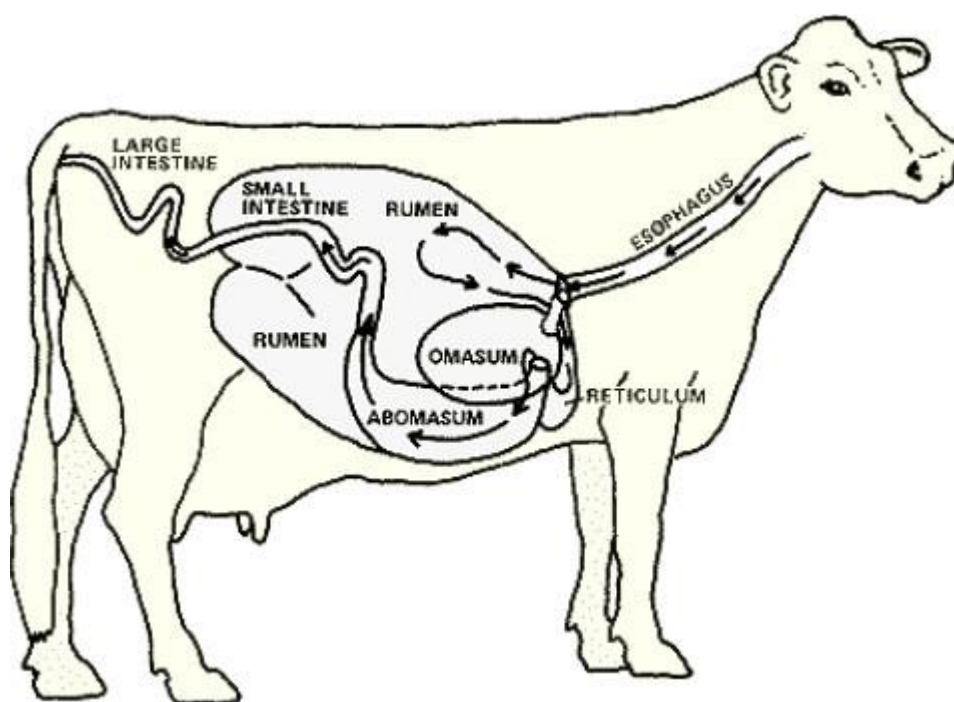


Fig. 1: El tracto digestivo de la vaca adulta

5. **Cuando el microbioma ruminal sale mal.** Los rumiantes a veces sufren condiciones severas y amenazantes de vida que no afectan a otros animales. Uno es la acidosis ruminal, otra,

inflar. Ambos ocurren como resultado de que el microbioma ruminal se vuelve anormal y, por lo tanto, disfuncional. La acidez del rumen solo se controla libremente, la acidez del VFA normalmente se neutraliza por compuestos amortiguadores en la saliva. Si la producción de ácido abruma la neutralización salival, causada generalmente por el consumo excesivo de alimentos fácilmente digeridos, el pH cae. La mayoría de los microorganismos ruminales no pueden crecer al pH inferior. Los que crecen producen ácido láctico en lugar de VFA. Como el ácido láctico es un ácido más fuerte que VFA, el pH continúa cayendo, hasta que solo un puñado de especies microbianas, que producen aún más ácido láctico, pueden sobrevivir. El pH bajo del rumen causa acidosis sistémica, lo que a menudo resulta en la muerte. La hinchazón ocurre cuando se forma una espuma estable en el rumen. El material que estabiliza la espuma puede provenir de la alimentación o, a veces, de los microorganismos mismos. Los gases resultantes de la actividad microbiana no pueden escapar, la presión aumenta a los niveles que conducen a la muerte del animal. Por lo tanto, la estabilidad del microbioma ruminal es relativamente frágil y su interrupción puede ser extremadamente grave para la salud del animal huésped.

Algunos números relacionados con el rumen y los rumiantes

- Hay alrededor de 10^{16} bacterias, 10^{14} arquea, 10^{11} protozoa y 10^{10} hongos en una vaca rumen.
- Las estimaciones de la diversidad varían, pero en términos de géneros hay 100-300 bacterias, 5-10 arquea, 12-25 protozoas y 10-18 hongos.
- El rumen de una vaca lechera produce hasta 5 kg de VFA y 0.4 kg de metano por día.
- Hay 3.500 millones de rumiantes en la tierra, de los cuales mil millones son ganado

6. *¿Cómo se manejan otros animales herbívoros? Muchas especies animales que no sean rumiantes consumen dietas ricas en fibra vegetal. Emplean una variedad de estrategias para hacerlo.* El panda gigante es un ejemplo extremo. Subsiste completamente en una dieta de bambú mal digerible. Quizás uno podría imaginar que el panda gigante podría tener algunos microorganismos intestinales altamente eficientes para hacer frente a este desafío, pero de hecho lo contrario es cierto. El panda se basa en una estrategia de alto rendimiento/baja digestión, por la cual casi no se produce una digestión de celulosa y el animal solo absorbe la pequeña cantidad de contenido soluble y digerible del bambú. Los caballos consumen aproximadamente los mismos tipos de materiales vegetales que los rumiantes, pero en lugar de un rumeno, el caballo tiene un caiego enormemente desarrollado al comienzo del intestino grueso. Los microorganismos que residen en el CaeCum del caballo no son los mismos que encontramos en el rumen, pero están relacionados y son similares en función. De manera crucial, los microbios formados como resultado de la fermentación cecal no pueden digerirse y su biomasa para nutrientes como en los rumiantes, pero esos nutrientes se pierden en las heces.

7. *Enfermedades zoonóticas.* El rumen protege efectivamente a los animales rumiantes de las molestias digestivas que son comunes en otros animales, porque las bacterias patógenas están superadas por el gran número de microorganismos indígenas. Sin embargo, el ganado en particular puede transportar bacterias patógenas que, aunque no causan enfermedades en el huésped, pueden causar infecciones graves cuando se transmiten al hombre, ya sea por contacto con heces o por ingestión en productos como el queso. *Salmonella* y *Escherichia coli* O157: H7 son dos de los agentes más comunes de la enfermedad transmitida por los alimentos en humanos. Ambos han sido aislados de la

carne de res y el ganado lechero a través de todas las etapas de producción, y ambos causan diarrea en humanos, con *E. coli* O157: H7 a menudo causando otros problemas graves también. El desprendimiento de los patógenos en las heces parece ser intermitente y puede ser difícil de detectar. Los rumiantes son depósitos naturales para estas bacterias y típicamente aparecen sin síntomas - mientras arrojan estas bacterias al medio ambiente. *Escherichia coli* O157: H7 pasa por el rumen y coloniza el recto de ganado. *Listeria monocytogenes* no causa estrictamente una enfermedad zoonótica que surge del ganado y las ovejas, ya que también pueden sentirse mal de la listeriosis, pero se cree que muchos animales llevan *L. monocytogenes* asintóticamente. El patógeno se excretará en las heces y luego se puede transmitir al hombre, en quien se produce una enfermedad grave, a menudo fatal. La infección *Listeria* generalmente se asocia con el consumo de queso no pasteurizado, pero también se puede transmitir a través de otros alimentos.

8. **Promotores del crecimiento y resistencia a los antibióticos.** La resistencia a los antibióticos en los patógenos humanos es una de las mayores amenazas para la salud que enfrentan la humanidad. Incluso las infecciones bacterianas menores podrían provocar una enfermedad grave si los antibióticos que ahora usamos ya no funcionan. Los rumiantes se consideran un depósito importante posible para bacterias y genes resistentes a los antibióticos. Los compuestos antimicrobianos se utilizan en la producción de rumiantes para dos propósitos principales, terapéuticamente para matar infecciones y producir productivamente la eficiencia de la conversión de alimentos en carne y leche. No hay duda de que se prescriben cantidades preocupantemente grandes de antibióticos para tratar la enfermedad en el ganado principalmente. Las implicaciones de estas prácticas se tratan en otros lugares. Sin embargo, los antimicrobianos que promueven el crecimiento deben verse en una luz completamente diferente. Aunque ampliamente utilizado, particularmente en América del Norte, compuestos como la monensina (un ionóforo) tienen un mecanismo de acción completamente diferente a los antibióticos terapéuticos, y no conducen a ninguna forma de resistencia a los antibióticos transmisibles. En cambio, hacen que los microorganismos de rumen sean más productivos al proporcionar nutrientes para el animal huésped, y al mismo tiempo, las emisiones de metano más bajas. Muchas naciones, incluidas las de la UE, se han inclinado a la presión percibida del consumidor y han elegido prohibir el uso de antimicrobianos que promueven el crecimiento sin excepción. Hay una discusión en cuanto a si los ionóforos para los rumiantes podrían considerarse beneficiosos para el medio ambiente: no dejan residuos, reducen el uso de recursos para la producción de ganado y disminuyen la cantidad de gases de efecto invernadero producidos.



Relevancia para los objetivos de desarrollo sostenible y los grandes desafíos

La producción de ganado de rumiantes afecta a muchos de los ODS, tanto de manera positiva como negativa, incluida

- **Objetivo 1. Finalizar la pobreza en todas sus formas en todas partes.** La capacidad que rumeen los microorganismos conferencias a ganado, ovejas y cabras para poder comer materiales que no compiten con los alimentos comestibles humanos es un recurso valioso para prevenir la pobreza y el hambre en muchas sociedades rurales. El ganado ocupa un lugar particularmente central en la socioecología de muchas de las personas más pobres del planeta. Además de ser una fuente de alimento, el ganado proporciona material fecal que, cuando se seca al sol, se usa para hacer incendios de cocción y materiales de construcción, el ganado es un recurso de riqueza tangible.
- **Objetivo 2. Finalizar el hambre, lograr la seguridad alimentaria y mejorar la nutrición y promover la agricultura sostenible.** Muchas áreas del planeta, como los pastizales permanentes, se volverían inhabitables sin la seguridad alimentaria que trae el ganado rumiante. La carne y la leche son altamente nutritivos, ciertamente en comparación con los alimentos vegetales disponibles en el mismo entorno. Una tendencia más preocupante es que mucho ganado se alimenta de cereales como el maíz y la cebada que podrían ser edibles.
- **Objetivo 3. Asegúrese de vidas saludables y promueva el bienestar de todas las edades.** Dos efectores opuestos entran en juego aquí. Los alimentos derivados de rumiantes son ricos en minerales, vitaminas y proteínas; También contienen ácido linoleico conjugado que promueven la salud (CLA), que no se encuentra en otros alimentos. Sin embargo, estas propiedades positivas para la salud deben compensarse con efectos dañinos bien documentados de la carne roja y el consumo de lácteos. Aunque estos últimos son en gran medida problemas asociados con el consumo excesivo, no pueden ignorarse en el contexto general de salud. Entonces también debemos considerar las infecciones humanas que se originan en el ganado rumiante. Se han mencionado *Salmonella*, *E. coli* O157: H7 y *L. monocytogenes*, pero otros incluyen criptosporidiosis, giardiasis, leptospirosis y tiña.
- **Objetivo 6. Asegure la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.** La excreta de rumiantes con frecuencia causa problemas de eliminación, y con demasiada frecuencia conduce a la contaminación de las vías fluviales. Si bien la gestión más cuidadosa puede minimizar estos problemas, la demanda de ganado para grandes cantidades de agua drena los recursos de la población humana. Estos problemas juntos significan que la producción de ganado tiene un impacto altamente negativo en los recursos hídricos para la humanidad.
- **Objetivo 7. Asegurar el acceso a energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos.** Si los desechos de ganado se pueden cosechar y procesar en un digestor anaeróbico, el uso de energía en la granja puede volverse más autónomo y sostenible. Irónicamente, los digestores anaeróbicos también producen metano, y es el metano que alimenta la generación de electricidad. Los digestores anaeróbicos también reducen los problemas asociados con deshacerse de los desechos de animales. Sin embargo, las implicaciones para el futuro consumo de bio combustibles son mucho más grandes. Las enzimas que son tan valiosas para permitir que los microorganismos ruminales digieran la fibra vegetal potencialmente también tienen un papel importante en la producción de biocombustibles.
- **Objetivo 11. Haga que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resistentes y sostenibles.** La proximidad de los rumiantes a los asentamientos humanos es

principalmente un problema rural, y la seguridad se refleja predominantemente en los problemas de salud, ver el objetivo 3, arriba.

- **Objetivo 13. Tome medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos.**

No hay aspectos positivos que se puedan tomar de la producción de ganado de rumiantes en relación con el cambio climático. Las emisiones de metano de la fermentación del rumen contribuyen una cantidad pequeña pero significativa a la producción de gases de efecto invernadero, y la liberación de óxido nitroso de la excreta también es problemática, dada la potencia del óxido nitroso como un gas de efecto invernadero. Este último puede ser minimizado por una buena gestión de residuos, pero el primero sigue siendo un problema difícil. Hay signos de que los nuevos aditivos de alimentación o estrategias de reproducción pueden reducir las emisiones de metano, pero es poco probable que eliminen las emisiones. El otro impacto importante de la producción de ganado rumi antes es la limpieza de las selvas tropicales, particularmente en la cuenca del Amazonas, para proporcionar tierras de pastoreo para el ganado. Las selvas tropicales son vitales para la salud del planeta, absorben dióxido de carbono y producen oxígeno. Solo las palancas políticas y económicas pueden detener esta tragedia.

- **Objetivo 15. Protege, restaure y promueva el uso sostenible de ecosistemas terrestres, gestione de manera sostenible los bosques, combate la desertificación y la detención y la degradación de la tierra inversa y la pérdida de biodiversidad.** Una vez más, existe un conflicto entre la producción de alimentos y la salud ambiental. Los rumiantes, generalmente ovejas y cabras, pero también rumiantes silvestres como los ciervos, siguen siendo el único medio para cosechar alimentos comestibles humanos de algunos paisajes. El ganado también convierte los pastizales en alimentos edibles humanos. Sin embargo, muchos de estos paisajes podrían apoyar alternativamente la silvicultura, ya sea por plantaciones planificadas o permitiendo que regrese n los bosques nativos. Hay 400,000 ciervos rojos en Escocia. Los ciervos comen retoños que de otro modo permitirían que el bosque nativo se regenere.

Posibles implicaciones para las decisiones

1. *Individual*

a. Decidir comer menos carne roja y productos lácteos, o convertirse en vegetariano o vegano. Pueden producirse algunos beneficios para la salud, si se presta atención cuidadosa a los requisitos nutricionales. El beneficio ambiental es más convincente.

b. ¿Deberíamos alentar a otros a seguir la ruta vegetariana/vegana?

2. *Políticas comunitarias*

a. Consecuencias ambientales locales de la producción de ganado de rumiantes: eliminación de desechos, seguridad, olor.

b. La agricultura como servicio comunitario, que brinda alimentos frescos y nutritivos a las comunidades locales.

3. *Políticas nacionales relacionadas con rumiantes*

a. ¿Debería haber un impuesto de carbono (gases de efecto invernadero) sobre la producción de ganado de rumiantes? ¿O la incentivación de los agricultores para cambiar la gestión del ganado para reducir mejor las emisiones?

b. Posible recaudación de un impuesto ambiental para los consumidores que compran carne roja y leche.

c. Transferencia de información mejorada de la investigación a los agricultores sobre el

manejo de animales y alimentación para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

d. Apoyar a los agricultores para mejorar la gestión de residuos para reducir las emisiones.

e. Inversión en investigación científica para comprender mejor las emisiones de metano rumen y encontrar formas de mitigar esas emisiones.

f. Revise los beneficios ambientales de los aditivos antimicrobianos que promueven el crecimiento. gramo. Controle las poblaciones de ciervos salvajes.

Participación de la pupila

1. *Discusión en clase*

- a. ¿Cuántos productos alimenticios derivados de rumiantes puedes nombrar?
- b. ¿Cuántos productos no alimentarios derivados de rumi antes puedes nombrar?
- c. ¿Qué alimentos derivados de rumiantes has comido en los últimos dos días?
- d. ¿Podrías comer menos carne?
- e. ¿Te gustaría ser vegetariano?
- f. ¿Te gustaría ser vegano?
- g. ¿Cuál es la diferencia?

2. *Conciencia de la parte interesada del alumno*

- a. ¿Cómo afectará el cambio climático su vida?
- b. ¿Cómo afectará el cambio climático a las personas en Bangladesh?
- c. ¿Cómo afectará el cambio climático a las personas en el África subsahariana?
- d. ¿Cómo podríamos ayudar a los agricultores?
- e. Si solo pudiéramos comer alimentos producidos a 10 k m de nuestra casa, ¿cuál serían?
- f. ¿Qué es lo que más extrañarías?

3. *Ceremonias*

- a. El metano es 28 veces más potente un gas de efecto invernadero que el dióxido de carbono. ¿Es una vaca o un automóvil más dañino para la atmósfera? (Una vaca produce 500 L de metano por día, un automóvil podría viajar 15,000 km en un año, emitiendo 120 g de CO₂ por km).
- b. ¿Qué opciones hay para hacer que el ganado produzca menos metano?
- c. ¿Cuál de las actividades del hombre produce más metano?
- d. ¿Cuál de las actividades del hombre produce la mayoría de los gases de efecto invernadero?

La base de evidencia, lectura adicional y ayudas para enseñar

Bach SJ, McAllister TA, Veira DM et al (2002). Transmisión y control de *Escherichia coli* O15 7: H7 - Una revisión. Can J Anim Sci 82: 475–490.

Henderson, G., F. Cox, S. Ganesh, A. Jon ker, W. Young y P. H. Janssen. 2015. La composición de la comunidad microbiana de rumen varía con la dieta y el huésped, pero se encuentra un microbioma central en un amplio rango geográfico. Sci. Rep. 5: 14567.

RE. Hungate (1966). El rumen y sus microbios. Academic Pre ss, Nueva York. ALASKA. Puniya et al. (Eds.) (2015), Microbiología del rumen: de la evolución a la revolución, DOI 10.1007/978-

81-322-2401-3_1.

Seshadri, R., Leahy, S., Attwood, G. et al. Cultivo y secuenciación de miembros del microbioma rumen de la colección Hungate1000. *Nat Biotechnol* 36, 359–367 (2018). <https://doi.org/10.1038/nbt.4110>

H. Steinfeld, P. Gerber, T. Wassenaar, V. Caste, M. Rosales, C. de Haan C, 'Long Shadow' de Livestock '. (FAO, Roma, 2006). Tapio, I., T. J. Snelling, et al. 2017. El microbioma ruminal asociado con las emisiones de metano del ganado rumiante. *J Anim Sci. Biotechnol.* 8: 7.

Wallace, R. J., G. Sasson, et al. 2019. Un subconjunto heredado del microbioma rumen de rumen dicta la productividad y las emisiones de las vacas lecheras. *Sci. Adv.* 5: EAAV8391.

Fig. Se reproduce del Programa de Extensión de la Universidad de Minnesota en <https://extension.umn.edu/dairy-nutrition/ruminant-digestive-system>.