

UNA REFLEXIÓN PROSPECTIVA SOBRE TÉCNICAS SOSTENIBLES PARA CONTROLAR LA REPRODUCCIÓN EN MAMÍFEROS DOMÉSTICOS

Philippe Chemineau^{1,2}

¹UMR Physiologie de la Reproduction et des Comportements, INRA, CNRS, Univ Tours, IFCE, 37380 Nouzilly, France. Philippe.Chemineau@tours.inra.fr

²EAAP - The European Federation for Animal Science. Via Tomassetti 3 - 00161 Roma, Italy.

INTRODUCCIÓN

Desde hace tiempo, pero sobre todo en los últimos 50 años, los avances científicos en el área de la estimación del valor genético de los animales de granja y en el desarrollo de la inseminación artificial con semen congelado y otras técnicas de reproducción, especialmente en el ganado lechero, han permitido un aumento espectacular en la tasa del progreso genético.

Sin embargo, hay que preguntarse si hemos llegado al límite en la aplicación de estas técnicas de control reproductivo, y es interesante centrarse en su sostenibilidad en condiciones agrícolas. Estos son los objetivos del presente texto.

Por lo tanto, después de una breve visión general de los intereses del control de la reproducción de animales de granja, vamos a revisar rápidamente los principales sistemas de reproducción existentes en las diferentes especies de mamíferos de granja y sus tendencias, las debilidades y desafíos existentes en estos sistemas. Terminaremos con el examen de los temas de investigación en los cuales se podría invertir en el futuro, y la necesidad de desarrollar un enfoque integrador con el fin de introducir las tecnologías de la reproducción dentro de los sistemas ganaderos para que puedan ser eficientes y sostenibles.

(1) ¿Cuál es el interés en el control de la reproducción animal?

1.1. Progreso genético

El primer interés es aumentar la velocidad del progreso genético. Una vez que la elección de un macho o una hembra se hace con rasgos específicos e interesantes, el agricultor desea difundir estos rasgos ampliamente en sus descendientes. Así, la primera y aún vigente forma de control de la reproducción, es elegir las hembras que son apareadas con un macho previamente seleccionado, con el fin de que su cría sea identificada y criada, para ser reproducida y mejorar la producción.

Desde hace más de 50 años, el amplio uso de la inseminación artificial (IA) con esperma congelado de la especie bovina ha provocado un espectacular aumento de la velocidad de la selección, principalmente debida a tres ventajas cruciales (van Arendonk, 2011). La primera es la posibilidad, dada por las pruebas de descendencia en las granjas, de evaluar el valor genético de los toros jóvenes, para seleccionar con precisión a los mejores machos antes de su muerte. La segunda es de difundir ampliamente el semen y los alelos favorables de estos mejores toros en el espacio y el tiempo para mejorar el valor genético del rebaño completo, a pesar de no haber participado en el esquema de prueba sobre descendencia. La tercera ventaja proviene de la posibilidad, debido a la presencia de descendientes de los mismos toros en diferentes granjas, de conectar los rebaños entre sí, y comparar su valor genético, sin confundirlo con los efectos del medio ambiente.

Esto es cierto para todas las especies de animales de granja, aunque la cantidad de esperma producido por los machos y el número mínimo de espermatozoides necesarios para la IA, que determina el número de hembras que pueden ser inseminadas artificialmente por macho, varía mucho entre especies (Chemineau et al., 2001). Las especies varían también en la capacidad del semen para ser congelado, y utilizarlo en granjas a un precio razonable en comparación con los ingresos de los ganaderos. Así, en los sistemas intensivos de ganado lechero, un amplio número de hembras son inseminadas artificialmente con el esperma congelado de un toro, mientras que, en el ganado ovino, un menor número de ovejas son inseminadas con semen fresco de un borrego.

La misma lógica se puede aplicar con la transferencia de embriones o, más recientemente, la fecundación in vitro con óvulos obtenidos por "pick-up". Sin embargo, es mucho más difícil y costoso aumentar la descendencia de la hembra que la del macho.

1.2. Elección de los periodos de parto

La elección de los periodos de partos, permite hacer frente a la variación de la disponibilidad de alimentos, al sistema de producción o a la demanda de los consumidores. La concentración de los partos en unas semanas o días, reduce el tiempo invertido en ellos y los costes, y permite un mejor cuidado a las crías, disminuyendo la mortalidad temprana. Después, la presencia de grupos homogéneos de animales permite satisfacer adecuadamente sus necesidades alimenticias, proporcionando curvas de crecimiento menos variables y grupos más homogéneos para la matanza y el mercado. El impacto social del control de la reproducción para la agricultura familiar es también importante porque da tiempo para otras actividades complementarias, o para descansar. Por lo tanto, el control de la reproducción es una forma para el agricultor de encontrar un equilibrio adecuado entre productividad, adaptación al mercado y la vida familiar.

1.3. Reducción de periodos improductivos en hembras

En la mayoría de especies de animales de granja, adelantar la pubertad aumenta su productividad a lo largo de su vida (cerdos, ganado vacuno, ovejas) y permite sincronizar su período de cría con la de los adultos (cerdos, ovejas y cabras). La reducción de la duración de reposo sexual anual (ovejas y cabras) permite el aumento de la productividad durante el año.

1.4. Características comunes entre especies para el objetivo de control reproductivo

La primera de ellas es la detección de comportamiento estral, y/o, eventualmente, asociado a la ovulación, en las hembras cíclicas. Esto se puede hacer a través de la observación de los animales por el ganadero, o por detección automática mediante la ayuda de la robótica.

La segunda es la sincronización de estros y ovulaciones fértiles en un momento preciso en el año. El "deseo" de sincronización puede ser muy preciso (ovulaciones repartidas en menos de 24 horas) con el fin de realizar la IA a tiempo fijo, sin detección de celos, o menos preciso (en días) si sólo se requiere la sincronización del parto. La sincronización se asocia, sobre todo en el ganado ovino, a un aumento moderado de la tasa de ovulación para proporcionar dos corderos por parto, pero no más.

La tercera es el aumento de la potencia de distribución de los alelos favorables de machos y/o hembras específicos. Este objetivo puede ser alcanzado en los machos a través de la mejora de la producción de esperma y la tecnología de semen, pero también de la mejor sincronización de las ovulaciones y condiciones de IA, que permite una reducción del número de espermatozoides inseminados para producir descendencia. En las hembras, este objetivo, como se dijo anteriormente, es más complicado de alcanzar, ya que producen menos ovocitos por período de ovulación y porque estos ovocitos son de más difícil acceso que el esperma de los machos. Superovulación y "ovum pick-up" asociados con la fecundación in vitro, son las principales medidas para mejorar la distribución de alelos de la hembra.

(2) ¿Cuál es la situación actual de los sistemas reproductivos de los animales de granja?

2.1. Las razones de la alta variabilidad entre especies en cuanto al control reproductivo.

La situación de las especies es muy variable por cuatro razones principales. La primera proviene de las diferencias biológicas entre especies en cuanto a sus características de reproducción. En efecto, tanto las especies de animales salvajes, como las especies de los animales de granja, han desarrollado diferentes características del ciclo estral en términos de duración, de presencia en el año y de tasa de ovulación.

La segunda proviene de la disposición de sus gametos (espermatozoides y ovocitos) para soportar la "supervivencia" in vitro que se requiere para producir un aumento en la tasa de difusión, o una facilidad para ser inseminada artificialmente. Por ejemplo, la tecnología

utilizada para congelar el semen de toros no funciona tan bien en otras especies. En ovinos, caprinos y cerdos, es necesario separar el plasma seminal antes de congelar (cabras, Nunes et al., 1982). En verracos, es necesario aumentar la concentración de espermatozoides del eyaculado (Martinat-Botte et al., 2009). En las ovejas, la única manera de obtener una tasa alta de fecundidad en IA usando esperma congelado, es depositarlo directamente en los cuernos uterinos (Vallet et al., 1992).

La tercera es debido al hecho de que algunas especies de importancia económica mayor recibieron mucha atención en términos de investigación desde hace 50 años, mientras que otras especies fueron atendidas sólo por un pequeño grupo de científicos.

La cuarta es que, dentro de una sola especie, hay una gran variabilidad entre los sistemas de cría de ganado alrededor del mundo (De Roest, 2011). En cuanto al número de explotaciones o el número de animales que usan técnicas para el control de la reproducción, es muy obvio que la mayoría no usa técnicas sofisticadas, y otras no utilizan ninguna técnica, solo la cubrición natural.

A pesar de la dificultad de este contexto, se intentó hacer una descripción real de los principales sistemas reproductivos, y de los problemas o preguntas acerca de la fertilidad, entre las especies y tipos de producción.

2.2. Bovinos

En el ganado lechero intensivo, el sistema más común está representado por las vacas Holstein, en las cuales la reproducción se realiza por IA con semen congelado después de la detección del estro natural. En este sistema, la selección intensa para la producción de leche se asocia con el aumento de problemas de fertilidad (Dobson et al., 2008). La fertilidad expresada en términos de tasas de no retornos después de la primera IA ha disminuido desde hace 15 años, y hoy es de un 40% en la mayoría de los casos. Estas dificultades pueden verse incrementadas por las condiciones locales (estrés térmico, uso de hormonas exógenas para aumentar la producción de leche), o disminuidas por una adecuada selección y/o un manejo menos agresivo. En las explotaciones más intensivas, la tasa de reemplazo no llega a cubrirse, lo que muestra que este sistema no es sostenible en el medio plazo. El primer problema con respecto a la reproducción existente en este sistema es la detección del celo, que necesita ser automatizado ya sea durante el ordeño (midiendo las hormonas en la leche, Asmussen, 2010) u observando la actividad del comportamiento. El segundo problema se refiere a la fertilidad por sí misma, ya que, incluso después de una buena detección de celo, las tasas de concepción son bajas e impredecibles. Estas dos áreas son los temas de programas de investigación en varios países actualmente (Garnsworthy et al., 2008; Royal et al., 2008; Wathes et al., 2008).

En el ganado de carne, la posición es mucho más dependiente de las condiciones locales de alimentación y, como resultado, el sistema reproductivo es altamente dependiente de la disponibilidad del forraje y de la gestión de las reservas corporales de las vacas durante el ciclo anual (Blanc y Agabriel, 2008; Alvarez-Rodriguez et al., 2009). La gran mayoría de las fecundaciones se logran mediante monta natural con un muy bajo control de la reproducción, los tratamientos hormonales se utilizan en un número limitado de sistemas de los países desarrollados. En la mayoría de los sistemas, la prioridad es sincronizar el estro y la ovulación en un periodo en el cual el final de la gestación y/o el parto se produzca cuando exista la mayor disponibilidad de forraje, de tal manera que la condición corporal al parto sea buena y/o que la madre tenga forraje para el amamantamiento. El objetivo económico de obtener un ternero por vaca por año no se alcanza en muchos sistemas, especialmente los de los trópicos o subtropicos donde la temporada de lluvias no está bien definida de un año a otro.

La situación del ganado de doble propósito es interesante porque el ganadero tiene que encontrar un equilibrio entre los dos propósitos, y porque él puede utilizar la interacción entre la disponibilidad de alimentos, la producción de leche y la presencia de terneros para controlar la actividad reproductiva de las vacas (Alejandrino et al. 1999; González-Stagnaro, 2008). Excepto en condiciones muy adversas cuando los recursos alimenticios limitan la recuperación de las reservas corporales, el control de la reproducción puede ser generalmente más fácil que en los dos sistemas anteriores. En este sistema, el ganadero

está generalmente más cerca de las hembras lecheras para detectar mejor el comportamiento de estro y entonces se organiza el apareamiento o el uso de IA.

Las biotecnologías reproductivas (congelación y transferencia de embriones, fecundación *in vitro* después de la obtención de óvulos y/o maduración de ovocitos) pueden ser utilizadas tanto en vacas lecheras como de carne, para ser incluidas en los esquemas de selección. Éstas son también útiles para intercambiar genotipos con una alta seguridad sanitaria de un país a otro (intercambio de machos vivos está prohibido actualmente) (Thibier, 2006).

2.3. Ovinos

La mayoría de las razas ovinas se crían para producir carne en sistemas extensivos, en los cuales los machos están en contacto permanente con las ovejas todo el año. En los sistemas de producción de latitudes templadas y subtropicales, la actividad reproductiva es controlada por los cambios fotoperiódicos que producen la presencia de una temporada de anestro, y limita las concepciones únicamente en otoño-invierno para que los corderos nazcan en invierno-primavera (Hafez, 1952). Dentro de las zonas tropicales, es la disponibilidad alimenticia que provoca periodos de partos más dispersos y menos predecibles, que pueden ser discordantes con la disponibilidad forrajera (Chemineau et al., 2007). En los sistemas intensivos de ovinos de carne, la sincronización hormonal utiliza la secuencia progestágenos- gonadotropinas, que permite la ovulación a un momento preciso después de retirar el progestágeno; entonces se hace una sola IA con semen refrigerado a una hora fija en un amplio número de hembras. En estos sistemas, la fertilidad después de la IA es generalmente superior al 55% de partos con una prolificidad entre 1,5 y 2,0. Esto permite una buena tasa de productividad cuando las ovejas paren tres veces en dos años (Benoit et al., 2009). En los sistemas menos intensivos, o en las granjas ecológicas, y sobre todo en las razas menos estacionales, como las razas procedentes de la cuenca del Mediterráneo, se utiliza el "efecto-macho" (re-introducción de carneros sexualmente activos en un grupo de ovejas anéstricas para inducir y sincronizar las ovulaciones fértiles) (Girard, 1813; Thimonier et al, 2000). Pero hasta donde sabemos, probablemente debido a una menor sincronía de la ovulación, el efecto macho es raramente asociado con la IA.

Las ovejas lecheras están más o menos en la misma situación reproductiva que las ovejas de carne en sistemas intensivos, pero el objetivo de los ganaderos es obtener un parto al año, no más. Estas razas se crían generalmente en zonas templadas o mediterráneas, sometidas a las variaciones fotoperiódicas naturales, que inducen una estacionalidad ovulatoria y de celo como en el ovino de carne. Cuando se utiliza la IA, como en el caso de los esquemas de selección intensiva para la producción de leche (Ugarte et al., 2014), la sincronización hormonal de la ovulación y del comportamiento estral es muy utilizada para la obtención de un calendario muy preciso de la ovulación para la inseminación con semen refrigerado (Lagriffoul et al. 2010)

Las biotecnologías reproductivas (congelación y transferencia de embriones, fecundación *in vitro* después de la obtención de óvulos y/o la maduración de ovocitos) (Cognie et al., 2004; Lagriffoul et al, 2010) pueden también ser utilizadas en ovino con objetivos iguales a los del ganado bovino, pero hasta donde sabemos, no se utilizan extensivamente a nivel empresarial, excepto para los intercambios de genotipos y la gestión de los núcleos de rebaños.

2.4. Caprinos

La mayoría de rebaños de cabras en el mundo se utilizan para la producción de carne y, como en el ganado ovino, generalmente los chivos están presentes todo el año con las hembras. El control fotoperiódico de la estacionalidad reproductiva (es decir, concepciones de septiembre a enero en el hemisferio norte) es muy intenso en las razas templadas y subtropicales que tienen un anestro profundo en primavera y verano. Como en ovejas, una estrategia oportunista de la reproducción basándose en la respuesta a la disponibilidad alimenticia se desarrolla en razas tropicales (Chemineau et al., 2007).

Las cabras lecheras o de doble propósito tienen un patrón reproductivo similar a las cabras de carne. Como en el ganado ovino en sistemas intensivos, las cabras pueden cubrirse mediante tratamientos hormonales con un sola IA con esperma congelado a una hora fija después de retirar el progestágeno (Corteel et al., 1988; González Stagnaro, 1984). Este

semen congelado puede provenir de machos cabríos mantenidos bajo ritmos luminosos acelerados, que permiten una producción todo el año de semen de alta calidad para congelación (Delgadillo et al., 1991; 1992; 1993). Bajo estas condiciones, las tasas de fertilidad de las cabras lecheras mantenidas en condiciones intensivas es generalmente del 60 % (Leboeuf et al., 2008). El semen refrigerado puede también utilizarse si los tratamientos fotoperiódicos acelerados se aplican a los machos cabríos con el fin de evitar la disminución estacional de la capacidad fecundante de los espermatozoides.

El efecto chivo es muy eficiente para inducir estros y ovulaciones fértiles (Chemineau, 1983. Chemineau et al., 2006), especialmente cuando los machos son estimulados con luz de tal manera que estén sexualmente activos cuando las cabras están en anestro (Delgadillo y Vélez, 2010; Delgadillo, 2011).

Las biotecnologías reproductivas (congelación y transferencia de embriones, fecundación in vitro después de la obtención de óvulos y/o maduración de ovocitos) (Ali Al Ahmad et al., 2008), podrían también ser utilizadas en cabras, como en vacas y ovejas, pero a nuestro conocimiento, no son ampliamente utilizadas a nivel comercial, a excepción de los intercambios de genotipos y situaciones muy excepcionales ("limpieza" de un rebaño para una enfermedad, por ejemplo).

2.5. Cerdos

El ritmo de producción intensiva de los cerdos está gobernado por el rendimiento reproductivo de las cerdas, que ovulan en un tiempo fijo después del destete de los lechones (Soede et al., 2011). Esto permite que el ganadero obtenga una sincronización natural de un grupo de hembras y la oportunidad de utilizar semen para la IA. El semen refrigerado se utiliza en gran escala debido a la capacidad de los espermatozoides del cerdo para sobrevivir hasta cinco días sin disminución significativa en la tasa de fecundación (Fantinati et al., 2009). Estas características han llevado al desarrollo de sistemas de reproducción con un rendimiento excepcional a un coste relativamente bajo, permitiendo así establecer programas rápidos y eficientes de mejora genética (Tribout et al., 2010). Los tratamientos hormonales se utilizan raramente pero se pueden aplicar a las cerdas jóvenes para sincronizar el primer estro, permitiendo una buena sincronización de la pira (van Leeuwen et al., 2011). La IA con semen congelado y/o la transferencia de embriones están todavía en su etapa inicial y no se utilizan más que de forma experimental en la actualidad.

La producción porcina "extensiva" (familiar) se realiza en unidades pequeñas, donde los animales están cerca del ganadero lo que permite una detección eficiente del estro después del destete de los lechones, y el apareamiento natural.

(3) ¿Cuáles son las tendencias, las debilidades y posibles retos?

Se espera que los sistemas ganaderos seguirán una clara tendencia a la intensificación para cubrir la fuerte demanda prevista de los productos de origen animal relacionado con el aumento de la población mundial con ingresos más altos, especialmente en países emergentes (De Roest, 2011). Sin embargo, es muy claro también que la mayoría de nuestros sistemas intensivos, desarrollados durante los últimos 50 años, han alcanzado (incluso pasado) algunos límites en términos de huella en el medio ambiente mundial (por ejemplo, nitrato y fosfato en el agua, gases de efecto invernadero por la fermentación entérica de los rumiantes y/o por el estiércol o purín de los cerdos) o el bienestar de los animales (el alojamiento en grupo de los animales o alojados en espacios estrechos). Necesitamos modificar estos sistemas intensivos con el fin de orientar su producción hacia una mayor sostenibilidad y bienestar de los animales, así como para proteger el medio ambiente.

A pesar de que, por razones de salud humana (enfermedades de sobrepeso y cardiovasculares), sería necesario reducir nuestro consumo de productos de origen animal a nivel mundial (especialmente en los países industrializados), ésto no será probablemente suficiente para cubrir las necesidades en productos de origen animal (Karl-Heinz, 2009; Paillard y Treyer, 2010; Paillard y Dorin, 2010; Ronzon et al., 2011). De este modo, la industria ganadera se enfrenta al reto de aumentar su producción y, al mismo tiempo, reducir su impacto sobre el medio ambiente.

La reproducción está involucrada de tres maneras en este desafío: (a) incrementar la eficiencia reproductiva por hembra, que permita una mejor productividad reduciendo así el impacto por kg de producto de origen animal, (b) desarrollar nuevas, innovadoras y eficientes tecnologías de reproducción sin hormonas para el control de la reproducción (Martin et al., 2004) (c) desarrollar la IA y biotecnologías reproductivas para ser utilizadas en plena asociación con la selección genómica.

3.1. El aumento de la eficiencia reproductiva.

El incremento de la eficiencia reproductiva debe llevarse a cabo como en el pasado, pero no únicamente para mejorar mediante el aumento de la media, sin tener en cuenta la variabilidad. Para las especies lecheras, el objetivo sigue siendo conseguir la máxima fertilidad, teniendo en cuenta que la selección para la fertilidad podría hacerse sin dejar la selección para la producción de leche (Barbat et al., 2010), debemos centrarnos en una mejor gestión de toda la vida útil de las hembras, tratando de encontrar una optimización entre la producción de leche y la fertilidad (Coyral-Castel et al., 2011). En el ganado vacuno de carne, una mejor gestión de las reservas corporales y de su reconstitución en momentos cruciales durante el ciclo reproductivo puede ser un objetivo con el fin de obtener un ternero por año y por vaca (Blanc et al., 2006). Para las especies polítopas criadas para la producción de carne, como ovejas y cerdos, la prolificidad seguirá siendo un componente importante de la rentabilidad para los ganaderos, por lo que sigue siendo un objetivo de mejorarla cuando sea posible (es decir, cuando la prolificidad es baja). Sin embargo, en los sistemas más intensivos, un control preciso de la variabilidad de tamaño de la camada sería un objetivo razonable para impedir el nacimiento de crías pequeñas, que tienen bajas probabilidades de supervivencia. En todos los sistemas ganaderos, el aumento de la eficiencia reproductiva es un gran contribuyente a la disminución de la huella ambiental por kg de producto de origen animal proveídos al consumidor. Sin embargo, ésta tendrá que ser calculada teniendo en cuenta el conjunto del sistema de producción, no solamente en la producción de la hembra.

3.2. Desarrollo de nuevas tecnologías de reproducción sin hormonas

Necesitamos desarrollar nuevas, innovadoras y eficientes tecnologías de reproducción sin hormonas para controlar la reproducción en el futuro. Desde hace aproximadamente 50 años, con el descubrimiento de los efectos muy potentes de los esteroides (progestágenos) y las gonadotropinas, la industria ha sido capaz de desarrollar formas altamente eficientes para controlar el momento y las tasas de concepción. Pero, por un lado, cada vez más discusiones parecen cuestionar el uso de estas hormonas en la producción animal, al menos en Europa, por razones sanitarias y éticas. Por otro lado, los propios productores se ven tentados a desarrollar sistemas nuevos y libres de hormonas de la reproducción de sus animales. La investigación en el área de las relaciones socio-sexuales entre animales se ha hecho, sobre todo, en los pequeños ruminantes (ovejas y cabras), en distintos sistemas de producción, para desarrollar sistemas innovadores basados en el «efecto-macho» (Girard, 1813; Underwood et al., 1944; Shelton, 1960; Chemineau, 1983; Thimonier et al., 2000) para el control fuera de la temporada de actividad reproductiva. Los avances también se realizaron en el ganado vacuno para manipular la duración del anestro posparto mediante la separación temporal corta (30 minutos por día) o larga (un día) del ternero (Stumpf et al., 1992; Soto Belloso et al., 1997; Fagundes et al., 2006; Escrivao et al., 2009; Alvarez-Rodríguez et al., 2010), asociado o no, con la presencia de los toros. Esto parece una técnica interesante para seguir investigándola (Bonavera et al., 1990; Monje et al., 1992; Gazal et al., 1999; Molina et al., 2002; Berardinelli y Joshi, 2005a, 2005b; Berardinelli et al., 2005; 2007; Berardinelli y Tauck, 2007; Miller y Ungerfeld, 2008). En los animales cíclicos, el desafío es encontrar formas eficientes y de bajo coste para la detección del comportamiento estral. Esto es claramente un área muy activa en cuanto a la investigación aplicada, al menos en el ganado vacuno y ovino.

3.3. Desarrollo de la IA y biotecnologías reproductivas

Por último, sigue siendo muy importante el desarrollo de la IA y biotecnologías reproductivas que se utilizarán en plena asociación con la selección genómica (Merton, 2011). La inseminación artificial es todavía una forma muy eficiente para llevar a cabo la mejora

genética, como se explicó anteriormente, y todavía es necesario mejorar su eficiencia y ampliar sus ámbitos de aplicación en el futuro. Esto significa que el semen refrigerado podría ser utilizado en asociación con esperma congelado. También tenemos que seguir investigando para determinar el número mínimo de espermatozoides que se pueden inseminar en las diferentes especies. Con las nuevas técnicas de selección genómica, probablemente será importante continuar con la investigación en biotecnologías reproductivas básicas y aplicadas para disminuir el intervalo entre generaciones, obteniendo lo antes posible (embrión) tejidos para la evaluación genómica, después la recolección de semen y ovocitos de animales muy jóvenes, una vez que su valor genético es conocido (Merton, 2011). El continuo desarrollo de estas biotecnologías reproductivas debe hacerse en estrecha asociación con los programas desarrollados simultáneamente en la selección genómica.

(4) ¿En qué ámbitos sería útil invertir en el futuro?

4.1. La primera dirección podría ser un mejor conocimiento de las bases fisiológicas y etológicas de las interrelaciones socio-sexuales entre animales. Los recientes resultados obtenidos en cabras lecheras utilizando machos sexualmente activos para inducir celos y ovulaciones fuera de la temporada (Delgadillo et al., 2009, 2011) o para mantener cabras (Delgadillo et al., 2015) y ovejas (Abecia et al., 2015) cíclicas todo el año, mostraron el potencial de estas relaciones socio-sexuales. También demostraron que probablemente las hemos subestimado como un medio para desarrollar técnicas nuevas y sostenibles para controlar la reproducción. La identificación de la responsabilidad relativa de la comunicación feromonal frente a la actividad de comportamiento en la respuesta al «efecto macho» podría ser de gran interés. Las feromonas se han identificado en cabras como productos de la degradación oxidativa de los ácidos grasos sintetizados y secretados por las glándulas sebáceas del cuello del chivo (Iwata et al., 2003; Okamura y Mori, 2005). Sin embargo, estos compuestos están involucrados en la atracción al macho, y la demostración formal de su eficacia para estimular la secreción de LH fue hecha recientemente (Murata et al., 2014).

En los sistemas de ganado vacuno de carne, la misma observación puede hacerse mediante la separación temporal de los terneros (Berardinelli y Joshi, 2005a; Kawashima et al., 2008) y la presencia del toro (Zalesky et al., 1984; Larson et al., 1994; Landaeta-Hernández et al., 2004; Landaeta-Hernández et al., 2006) para acortar el anestro posparto. Ésta es un área ya explorada (Custer et al., 1990; Burns y Spitzer, 1992; Fernández et al., 1996; Fike et al., 1996; Bolaños et al., 1998; Rekwot et al., 2000a, 2000b; Ruas et al., 2001; Rekwot et al., 2004; Calegare et al., 2009; Fiol et al., 2010; Tauck et al., 2010), pero requiere continuar con la investigación para entender mejor las razones de la variabilidad de la respuesta ovárica al amamantamiento (Alvarez-Rodríguez et al., 2009, 2010). Se han realizado también intentos para identificar las feromonas responsables de los efectos de la presencia del toro en la reducción del anestro posparto (Tauck et al., 2006; Tauck y Berardinelli, 2007; Tauck et al., 2010).

En los cerdos, la eficiencia del destete de los lechones para la inducción de celos fértiles podría ser un modelo interesante para entender mejor cuáles son los mecanismos subyacentes implicados en este efecto del destete. De la misma manera que en el bovino, el amamantamiento temporal de los lechones produce resultados variables que sería interesante estudiar con más detalle (Gerritsen et al., 2008). En todas estas especies, podría ser útil conocer cuáles son las señales sensoriales implicadas en la percepción de la pareja para entender mejor la importancia de la actividad sexual y/o social en la obtención de una respuesta reproductiva.

En todas las especies de mamíferos de granja, un mejor conocimiento de los mecanismos utilizados por los machos (o hembras) para detectar las hembras en celo también podría ser de gran interés (Delgadillo et al., 2009). Las feromonas asociadas al estro han sido identificadas en algunas especies silvestres (elefante: Lazar et al., 2002; Goodwin et al., 2006) y también algunos productos han sido identificados en bovino, aunque su actividad biológica no es tan clara como en especies silvestres (Kumar et al., 2000; Sankar y Archunan 2004; Sankar et al., 2007). Recientemente, tres productos asociados con el estro

de vaca demostraron ser activos para mejorar el comportamiento de toros (Le Danvic et al., 2015).

4.2. La segunda dirección podría ser una inversión importante en el control genético de los caracteres reproductivos. Desde la secuenciación de los genomas de nuestras especies domésticas y con el desarrollo muy fuerte de la selección genómica, ahora es posible tener en cuenta los caracteres menos heredables dentro de los programas de mejora genética. Éste es el caso de los caracteres de fertilidad que tienen baja heredabilidad y que son difíciles de fenotipar. La fertilidad de vacas lecheras en sistemas intensivos ya se tiene en cuenta en los planes de selección (Berglund, 2008; Barbat et al., 2010). Los otros caracteres descritos anteriormente (estacionalidad, duración del anestro post-parto, comportamiento sexual, superovulación, etc.) podrían ser explotados mejor en términos de su control genético (AlShorepy y Notter, 1997; Hanocq et al., 1999), y luego identificar los genes y alelos responsables de fenotipos favorables y usados en esquemas de selección.

4.3. La tercera dirección es el esfuerzo continuo en el desarrollo de la eficiencia de las biotecnologías reproductivas «clásicas» (IA, transferencia de embriones, fecundación in vitro, etc.), al mismo tiempo que una inversión en nuevas biotecnologías (clonación y recombinación homóloga) (Merton, 2011) que podrían permitir el acceso a los animales muy jóvenes, incluso al embrión mismo, en el cual se podría utilizar sólo un pequeño conjunto de células para evaluar polimorfismos marcadores (Le Bourhis et al., 2011). Una vez conocidos, los animales jóvenes se utilizarán para producir descendientes tan pronto como sea posible. Se prevé nuevamente interés por las hembras de élite para que la estimación del valor genómico sea mucho más fácil, y que podría ser una interesante manera de producir descendientes de alto valor.

Las nuevas biotecnologías de la reproducción, que se definen aquí como las que tienen por objeto modificar la secuencia del genoma y/o la expresión del genoma, son también un área en la cual los laboratorios más avanzados pueden invertir. Por lo menos en Europa, debido a la renuncia de la sociedad hacia estas técnicas, hay poca posibilidad de utilizarlas en condiciones de campo en un futuro próximo, sino más bien a utilizarlas como herramientas para explorar el papel de los genes sospechosos de controlar un carácter específico y la importancia de la epigenética en la construcción de los fenotipos adultos.

4.4. La cuarta dirección está claramente dirigida hacia la ingeniería de nuevas e innovadoras técnicas de reproducción para ser utilizadas en condiciones de granja. Las técnicas más antiguas, como la secuencia progestágenos-gonadotropinas y/o el uso de prostaglandinas (Macmillan, 2010; Islam, 2011), que actualmente se utilizan en millones de hembras cada año, han requerido al menos diez años y fuertes esfuerzos para pasar del descubrimiento en el laboratorio a un uso correcto en condiciones de campo. Este será el caso para las técnicas nuevas y sostenibles descritas anteriormente, que requerirán la ingeniería específica para una aplicación correcta en las condiciones de granja. Esta ingeniería es claramente parte de la investigación y debe ser realizada por los propios laboratorios, que invierten de forma simultánea en investigación más básica.

La ingeniería para la detección del celo sigue siendo un área de mucho interés en el ganado lechero, donde la supervisión del estado endocrino dos veces al día de las hembras de ordeño fue propuesto como una técnica automática para detectar el final de una fase lútea y el inicio de la siguiente fase folicular asociado con una probabilidad alta del estro (Asmussen, 2010). Como se mencionó anteriormente, la identificación de las feromonas asociadas a un comportamiento estral (Le Danvic et al., 2011) podría ser el comienzo de un programa de ingeniería usando ya sea proteínas olfativas vinculantes y/o la proteína del receptor de feromonas capaces de detectar automáticamente el estado de la hembra, así como perros entrenados que son capaces de hacerlo (Fischer-Tenhagen et al., 2011) y de esta forma reemplazar machos detectores. La cuantificación del comportamiento animal también podría intentarse automáticamente ya sea mediante la detección visual con cámaras de video, la estimación de la situación de las hembras, o equipar las hembras o los machos detectores con un aparato electrónico capaz de registrar los movimientos, y luego estimar su valor predictivo para el comportamiento estral (Lee et al., 2008). Recientemente, un delantal electrónico se desarrolló en ovejas y cabras para equipar carneros detectores.

Éste cuenta el número de montas para una hembra específica por período de tiempo, después calcula la probabilidad de que pueda estar en celo (Bocquier et al., 2006).

El uso de nuevas moléculas no hormonales, podría ser de gran interés en el control de la reproducción de animales de granja. Las moléculas pueden provenir de plantas que contienen esteroides nativos (especialmente progesterona, como la hoja de nogal, Pauli et al., 2010) o compuestos desconocidos, a partir de plantas que son conocidas en la farmacopea local que tienen efectos en la reproducción (en animales o seres humanos), como análogos de progesterona en raíces de la farmacopea china (Manir-Hamed et al., 2014). Pero estas moléculas también pueden proceder de descubrimientos de investigación y podrían ser péptidos y/o anticuerpos capaces de estimular las hormonas endógenas (Hervé et al., 2004).

(5) Necesidad de un enfoque sistémico dentro de los sistemas agrícolas

Además de ser técnicamente eficientes, las técnicas de reproducción deben desarrollarse respetando los tres pilares de la sostenibilidad: medio ambiente, economía y sociedad. Por lo tanto, deben ser incluidas dentro de los sistemas ganaderos en los que se supone que deben ser aplicadas, teniendo en cuenta estos tres elementos. Así, se debe evaluar la sostenibilidad del sistema agrícola por sí mismo, en lugar de la técnica reproductiva propiamente aplicada (Gamborg y Sandoe, 2005; Neeteson-van Nieuwenhoven et al., 2006). Respetar el medio ambiente es el primer objetivo para los sistemas reproductivos sostenibles. En este sentido, la reducción del uso de hormonas exógenas es un objetivo a alcanzar, con el fin de reducir los posibles efectos sobre los ecosistemas, especialmente en la biodiversidad. Sin embargo, como se explicó anteriormente, la sostenibilidad no debe ser sólo evaluada en el nivel de la técnica en sí, sino más bien a nivel del sistema agrícola, para impedir la adopción de una nueva técnica que puede tener efectos positivos, pero efectos adversos para el sistema completo (Baxter et al., 2011).

El segundo pilar es económico, y es obvio que una nueva técnica para el control de la reproducción de los animales debe tener un interés económico para el ganadero con el fin de ser adoptada a gran escala (Moyo et al., 2009). Este interés económico no es fácil de estimar, ya que puede contener una ventaja en términos de mano de obra o en términos de imagen del sistema ganadero por sí mismo, que puede proporcionar una ventaja para comercializar los productos (por ejemplo, las granjas ecológicas que prohíben el uso de hormonas exógenas para la sincronización del celo). Sin embargo, igual que en el caso del medio ambiente, la sostenibilidad económica debe apreciarse más allá de la granja para apreciar su eficacia (por ejemplo, la posible exclusión de la inseminación artificial en las granjas ecológicas, y por tanto del progreso genético) (Brocard y Portier, 2008 ; Pellicer-Rubio et al., 2008; Benoit et al., 2009; Nauta, 2009).

Por último, la sostenibilidad también debe ser de tipo social, con el fin de validar el hecho de que la técnica considerada es socialmente aceptable (por ejemplo, no ir en contra del bienestar de los animales) y podría ser aceptada por los propios ganaderos y por los agentes sociales que tienen algún interés en la zona (Costa-Neto, 2000; Cristofori et al., 2005; Mwacharo y Drucker, 2005; Kosgey et al., 2006; Getachew et al., 2010; Murage y Ilatsia, 2011). Finalmente, en la aceptación social, también podríamos plantear la importancia de las nuevas ideas, en parte procedentes de observaciones científicas de la naturaleza y las prácticas de los ganaderos, que pueden jugar un papel en el desarrollo de nuevas técnicas para el control de la reproducción (Mesa y Machado, 2009).

CONCLUSIÓN

Como para muchos otros ámbitos de la agricultura, el control de la reproducción de los mamíferos de granja se enfrenta a un nuevo y contradictorio desafío: se debe seguir mejorando la productividad (es decir, la fecundidad de las hembras) con el fin de reducir la huella ambiental indirecta del ganado produciendo más con el mismo número de animales, pero, al mismo tiempo, reducir el impacto directo de los sistemas ganaderos en el medio ambiente y en el bienestar de los animales. La exploración de nuevas y más respetuosas formas de control de la reproducción animal no es sólo una necesidad, sino que también

parece factible, sobre todo mediante la inversión en un mejor conocimiento de las bases fisiológicas y etológicas de las relaciones socio-sexuales entre animales. La identificación de las feromonas sexuales, asociada a un mejor conocimiento de las señales sensoriales utilizadas por las hembras para percibir la actividad sexual del macho, puede llevar a la ingeniería de bio-técnicas nuevas y sostenibles, capaces de evaluar el estado de comportamiento y/o endocrino de las hembras, e inducir su actividad sexual durante el anestro. El reemplazo de hormonas exógenas también parece factible si se invierte en la identificación de nuevas fuentes de hormonas naturales, por ejemplo en las plantas. Sin embargo, debemos recordar aquí que la sostenibilidad debe ser evaluada al nivel de todo el sistema de explotación y no sólo a nivel de la propia técnica de reproducción. Esta evaluación no es trivial y necesita una buena visión general del sistema considerado para conseguir una alta eficacia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abecia, J.A., Flores, J.A., Keller, M., Duarte, G., Forcada, F., Chemineau, P. Delgadillo, J.A. 2015. Permanent contact with sexually active rams extends oestrous activity of ewes in spring (in preparation).
- Alejandrino, A.L., et al. 1999. Constraints on dairy cattle productivity at the smallholder level in the Philippines. *Prev. Vet. Med.* 38: 167-178.
- Ali Al Ahmad, M.Z., et al. 2008. Lack of risk of transmission of caprine arthritis-encephalitis virus (CAEV) after an appropriate embryo transfer procedure. *Theriogenology* 69: 408-415.
- AlShorepy, S.A., Notter, D.R. 1997. Response to selection for fertility in a fall-lambing sheep flock. *J. Anim. Sci.* 75: 2033-2040.
- Alvarez-Rodriguez, J., et al. 2009. Performance and nursing behaviour of beef cows with different types of calf management. *Animal* 3(6): 871-878.
- Alvarez-Rodríguez J., et al. 2010. Metabolic and luteal function in winter-calving Spanish beef cows as affected by calf management and breed. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 94: 385-394.
- Asmussen, T. 2010. Herd Navigator or "how to benefit from frequent measurements". ICAR Technical Series, 291-293.
- Barbat, A., et al. 2010. Female Fertility in French Dairy Breeds: Current Situation and Strategies for Improvement. *J. Reprod. Dev.* 56: S15-S21.
- Baxter, E.M., et al. 2011. Alternative farrowing systems: design criteria for farrowing systems based on the biological needs of sows and piglets. *Animal* 5: 580-600.
- Benoit, M., et al. 2009. Is intensification of reproduction rhythm sustainable in an organic sheep production system? A 4-year interdisciplinary study. *Animal* 3: 753-763.
- Berardinelli, J.G., Joshi, P.S. 2005a. Initiation of postpartum luteal function in primiparous restricted-suckled beef cows exposed to a bull or excretory products of bulls or cows. *J. Anim. Sci.* 83: 2495-2500.
- Berardinelli, J.G., Joshi, P.S. 2005b. Introduction of bulls at different days postpartum on resumption of ovarian cycling activity in primiparous beef cows. *J. Anim. Sci.* 83: 2106-2110.
- Berardinelli, J.G., et al. 2005. Postpartum resumption of ovarian cycling activity in first-calf suckled beef cows exposed to familiar or unfamiliar bulls. *Anim. Reprod. Sci.* 90: 201-209.
- Berardinelli, J.G., et al. 2007. Conception rates to artificial insemination in primiparous, suckled cows exposed to the biostimulatory effect of bulls before and during a gonadotropin-releasing hormone-based estrus synchronization protocol. *J. Anim. Sci.* 85: 848-852.
- Berardinelli, J.G., Tauck, S.A. 2007. Intensity of the biostimulatory effect of bulls on resumption of ovulatory activity in primiparous, suckled, beef cows. *Anim. Reprod. Sci.* 99: 24-33.
- Berglund, B. 2008. Genetic improvement of dairy cow reproductive performance. *Reproduction in Domestic Animals* 43: 89-95.

- Blanc, F., Agabriel, J. 2008. Modelling the reproductive efficiency in a beef cow herd: effect of calving date, bull exposure and body condition at calving on the calving-conception interval and calving distribution. *J. Agric. Sci.* 146: 143-161.
- Blanc, F., et al. 2006. Adaptive abilities of the females and sustainability of ruminant livestock systems. A review. *Animal Research* 55: 489-510.
- Bocquier, F., et al. 2006. Utilisation de l'identification électronique pour la détection automatisée du comportement sexuel chez les ovins : perspectives pour la détection des chaleurs chez la brebis, 13. *Rencontres Recherches Ruminants. 2006/12/06-07*, INRA-Institut National de la Recherche Agronomique (FRA), Institut de l'Élevage (FRA), Paris (FRA), pp. 155-162.
- Bolanos, J.M., et al. 1998. Biostimulatory effects of estrous cows and bulls on resumption of ovarian activity in postpartum anestrous Zebu (*Bos indicus*) cows in the humid tropics. *Theriogenology* 49: 629-636.
- Bonavera, J.J., et al. 1990. A note on the effects of 72-hour calf removal and or bull exposure upon postpartum reproductive-performance of angus cows. *Animal Production* 50: 202-206.
- Brocard, V., Portier, B. 2008. Impacts of compact calvings and once-a-day milking in grassland based systems. *Biodiversity and animal feed: future challenges for grassland production. Proceedings of the 22nd General Meeting of the European Grassland Federation, Uppsala, Sweden, 9-12 June 2008*: 789-791.
- Burns, P.D., Spitzer, J.C. 1992. Influence of biostimulation on reproduction in postpartum beef-cows. *J. Anim. Sci.* 70: 358-362.
- Calegare, L., et al. 2009. Cow/calf preweaning efficiency of Nellore and *Bos taurus* x *Bos indicus* crosses. *J. Anim. Sci.* 87: 740-747.
- Chemineau, P. 1983. Effect on estrus and ovulation of exposing creole goats to the male at 3 times of the year. *J. Reprod. Fertil.* 67: 65-72.
- Chemineau, P., et al. 2001. La maîtrise de la reproduction des mammifères domestiques. , In: Thibault, M.C.L.C. (Ed.), *La reproduction chez les mammifères et l'homme*, Ellipses, Paris, pp. 792-801.
- Chemineau, P., et al. 2007. Seasonality of reproduction and production in farm fishes, birds and mammals. *Animal* 1: 419-432.
- Chemineau, P., et al. 2006. Male-induced short oestrous and ovarian cycles in sheep and goats: a working hypothesis. *Reprod. Nutr. Dev.* 46: 417-429.
- Cognie, Y., et al. 2004. State-of-the-art production, conservation and transfer of in-vitro-produced embryos in small ruminants. *Reprod. Fertil. Dev.* 16: 437-445.
- Corteel, J.M., et al. 1988. Artificial breeding of adult goats and kids induced with hormones to ovulate outside the breeding season. *Small Rumin. Res.* 1(1): 19-35.
- Costa-Neto, E.M. 2000. Knowledge and traditional uses of animal resources by an Afro-Brazilian community. Preliminary results. *Interiencia* 25: 423-+.
- Coyral-Castel, S., et al. 2011. Ovarian parameters and fertility of dairy cows selected for one QTL located on BTA3. *Theriogenology* 75: 1239-1250.
- Cristofori, F., et al. 2005. Artificial insemination using local cattle breeds in Niger. *Trop. Anim. Health Prod.* 37: 167-172.
- Custer, E.E., et al. 1990. Postpartum interval to estrus and patterns of LH and progesterone in first-calf suckled beef cows exposed to mature bulls. *J. Anim. Sci.* 68: 1370-1377.
- De Roest, K. 2011. Competition between production systems facing an increase of world demand for dairy and meat., In: EAAP (Ed.), *62nd Annual Meeting of the European Federation of Animal Science*, Stavanger, Norway.
- Delgadillo, J.A. 2011. Environmental and social cues can be used in combination to develop sustainable breeding techniques for goat reproduction in the subtropics. *Animal* 5: 74-81.
- Delgadillo, J.A., et al. 2015. Sexually active males prevent the display of seasonal anestrus in female goats, *Hormones and Behavior* 69: 8-15. (DOI: [10.1016/j.yhbeh.2014.12.001](https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2014.12.001))

- Delgadillo, J.A., et al. 2009. The 'male effect' in sheep and goats-Revisiting the dogmas. *Behav. Brain Res.* 200: 304-314.
- Delgadillo, J.A., et al. 1991. Decrease in the seasonality of sexual behavior and sperm production in bucks by exposure to short photoperiodic cycles. *Theriogenology* 36: 755-770.
- Delgadillo, J.A., et al. 1992. Abolition of seasonal variations in semen quality and maintenance of sperm fertilizing ability by photoperiodic cycles in goat bucks. *Small Rumin. Res.* 9: 47-59.
- Delgadillo, J.A., et al. 1993. Maintenance of sperm production in bucks during a 3rd year of short photoperiodic cycles. *Reprod. Nutr. Dev.* 33: 609-617.
- Delgadillo, J.A., Velez, L.I. 2010. Stimulation of reproductive activity in anovulatory Alpine goats exposed to bucks treated only with artificially long days. *Animal* 4: 2012-2016.
- Dobson, H., et al. 2008. Why is it getting more difficult to successfully artificially inseminate dairy cows? *Animal* 2: 1104-1111.
- Escrivao, R.J.A., et al. 2009. Effects of 12 hour calf withdrawal on conception rate and calf performance of *Bos indicus* cattle under extensive conditions. *Trop. Anim. Health Prod.* 41: 135-139.
- Fagundes, N.S., Nascimento, M.R.B.M., Diniz, E.G. 2006. Effect of biostimulation and shang on the pregnancy rate and postpartum oestrus manifestation of nursing beef cows. *Veterinaria Noticias* 12: 123-126.
- Fantinati, P., et al. 2009. Evaluation of swine fertilisation medium (SFM) efficiency in preserving spermatozoa quality during long-term storage in comparison to four commercial swine extenders. *Animal* 3: 269-274.
- Fernandez, D.L., et al. 1996. Acute and chronic changes in luteinizing hormone secretion and postpartum interval to estrus in first-calf suckled beef cows exposed continuously or intermittently to mature bulls. *J. Anim. Sci.* 74: 1098-1103.
- Fike, K.E., et al. 1996. Influence of fenceline bull exposure on duration of postpartum anoestrus and pregnancy rate in beef cows. *Anim. Reprod. Sci.* 41: 161-167.
- Fiol, C., et al. 2010. Response to biostimulation in peri-puberal beef heifers: influence of male-female proximity and heifer's initial body weight. *Theriogenology* 74: 569-575.
- Fischer-Tenhagen, C., et al. 2011. Training dogs on a scent platform for oestrus detection in cows. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 131: 63-70.
- Gamborg, C., Sandoe, P. 2005. Sustainability in farm animal breeding: a review. *Livest. Prod. Sci.* 92: 221-231.
- Garnsworthy, P.C., et al. 2008. Integration of physiological mechanisms that influence fertility in dairy cows. *Animal* 2: 1144-1152.
- Gazal, O.S., et al. 1999. Effects of time of suckling during the solar day on duration of the postpartum anovulatory interval in Brahman x Hereford (F1) cows. *J. Anim. Sci.* 77: 1044-1047.
- Gerritsen, R., Soede, N.M., Langendijk, P., Hazeleger, W., Kemp, B. 2008. The intermittent suckling regimen in pigs: Consequences for reproductive performance of sows. *Reprod. Dom. Anim.* 43: 29-35.
- Getachew, T., et al. 2010. Herd management and breeding practices of sheep owners in a mixed crop-livestock and a pastoral system of Ethiopia. *Afr. J. Agric. Res.* 5: 685-691.
- Girard, L., 1813. Moyens employés avec succès, par M. Morel de Vindé, Membre de la Société d'Agriculture de Seine et Oise, pour obtenir, dans le temps le plus courts possible, la fécondation du plus grand nombre des brebis portières d'un troupeau. . *Ephémérides de la Société d'Agriculture du Département de l'Indre pour l'An 1813, Séance du 5 septembre, Chateauroux, Département de l'Indre, France* VII: 66-68.
- Gonzalez-Stagnaro, C. 1984. Hormonal control of the oestrous cycle in small ruminants in tropical areas. *Reproduction des ruminants en zone tropicale. Reunion internationale, Pointe-a-Pitre, Guadeloupe, 8-10 juin 1983: 433-471.*
- Gonzalez-Stagnaro, C. 2008. Benchmarking in Reproductive Control Programs of tropical dual purpose crossbred herds. *Reprod. Domestic Anim.* 43: 42-42.

- Goodwin, T.E., et al. 2006. Insect pheromones and precursors in female african elephant urine. *J. Chem. Ecol.* 32: 1849-1853.
- Hafez, E.S.E. 1952. Studies on the breeding season and reproduction of the ewe. *J. Agric. Sci.* 42: 189-265.
- Hanocq, E., et al. 1999. Genetic parameters of spontaneous spring ovulatory activity in Merinos d'Arles sheep. *Genet. Sel. Evol.* 31: 77-90.
- Hervé, V., et al. 2004. Antiequine chorionic gonadotropin (eCG) antibodies generated in goats treated with eCG for the induction of ovulation modulate the luteinizing hormone and follicle-stimulating hormone bioactivities of eCG differently. *Endocrinology* 145: 294-303.
- Islam, R. 2011. Synchronization of estrus in cattle: a review. *Veterinary World* 4: 136-141.
- Iwata, E., et al. 2003. Substances derived from 4-ethyl octanoic acid account for primer pheromone activity for the "male effect" in goats. *J. Vet. Med. Sci.* 65: 1019-1021.
- Karl-Heinz, E., et al. 2009. Eating the Planet: Feeding and fuelling the world sustainably, fairly and humanely – a scoping study., In: Vienna, I.o.S.E.a.P.P. (Ed.), *Social Ecology Working Paper No. 116*.
- Kawashima, C., et al. 2008. Effect of suckling on the reproductive performance and metabolic status of obese Japanese black cattle during the early postpartum period. *J. Reprod. Dev.* 54: 46-51.
- Kosgey, I.S., et al. 2006. Successes and failures of small ruminant breeding programmes in the tropics: a review. *Small Rumin. Res.* 61: 13-28.
- Kumar, K.R., et al., 2000. Chemical characterization of bovine urine with special reference to oestrus. *Vet. Res. Commun.* 24:445-54
- Lagriffoul, G., et al. 2010. Sheep breeding programs in France using modern reproductive methods: application for genetic improvement of scrapie resistance in the national sheep flock. *Proceedings of the 8th World Merino Conference, Merinoscope 2010, Rambouillet, France, 3-5 May 2010: 2-01*.
- Landaeta-Hernandez, A.J., et al. 2004. Effect of biostimulation on uterine involution, early ovarian activity and first postpartum estrous cycle in beef cows. *Theriogenology* 61: 1521-1532.
- Landaeta-Hernandez, A.J., et al. 2006. Effect of biostimulation on the expression of estrus in postpartum Angus cows. *Theriogenology* 66: 710-716.
- Larson, C.L., et al. 1994. Effect of postpartum bull exposure on calving interval of 1st-calf heifers bred by natural service. *Can. J. Anim. Sci.* 74: 153-154.
- Lazar, J., et al. 2002. Molecular and functional characterization of an odorant binding protein of the Asian elephant, *Elephas maximus*: Implications for the role of lipocalins in mammalian olfaction. *Biochemistry* 41: 11786-11794.
- Le Bourhis, D.A., et al. 2011. 193 bovine embryo genotyping using a 50k single nucleotide polymorphism chip. *Reprod. Fertil. Dev.* 23: 197.
- Le Danvic, C., et al. 2011. Identification of oestrus chemical cues in the dairy cow, *Chemical Signals in Vertebrates XII, Berlin, August 28-31*.
- Le Danvic, C., et al. 2015. Enhancing bull sexual behaviour using oestrus-specific molecules identified in cow urine. *Theriogenology* (accepted for publication).
- Leboeuf, B., et al. 2008. Management of goat reproduction and insemination for genetic improvement in France. *Reprod. Domestic Anim.* 43: 379-385.
- Lee, C., et al. 2008. Behavioral aspects of electronic bull separation and mate allocation in multiple-sire mating paddocks. *J. Anim. Sci.* 86: 1690-1696.
- Macmillan, K.L. 2010. Recent Advances in the Synchronization of Estrus and Ovulation in Dairy Cows. *J. Reprod. Dev.* 56: S42-S47.
- Manir Ahmed, M.H., et al. 2014. Molecular screening of Chinese medicinal plants for progestogenic and anti-progestogenic activity. *J. Biosci.* 39: 453-461.
- Martin, G.B., et al. 2004. Natural methods for increasing reproductive efficiency in small ruminants. *Anim. Reprod. Sci.* 82-3: 231-246.

- Martinat-Botte, F., et al. 2009. Biotechnologies of porcine reproduction: from routine techniques to emerging methods. *Prod. Anim.* 22: 97-115.
- Merton, S., 2011. New tools in reproduction technologies, In: EAAP (Ed.), 62nd Annual Meeting of the European Federation of Animal Science, Stavanger, Norway.
- Mesa, A.R., Machado, H. 2009. Training of producers and management staff for the adoption of sustainable animal production technologies. *Pastos y Forrajes* 32: 93-100.
- Miller, V., Ungerfeld, R. 2008. Weekly bull exchange shortens postpartum anestrus in suckled beef cows. *Theriogenology* 69: 913-917.
- Molina, R., et al. 2002. Effect of alternating bulls as a management tool to improve the reproductive performance of suckled Zebu cows in the humid tropics of Costa Rica. *Anim. Reprod. Sci.* 69: 159-173.
- Monje, A.R., et al. 1992. Male effect on the postpartum sexual-activity of cows maintained on 2 nutritional levels. *Anim. Reprod. Sci.* 29: 145-156.
- Moyo, S., et al. 2009. Development of livestock production systems in Africa: challenges and opportunities. *Animal production and animal science worldwide: WAAP book of the year 2007*: 15-26.
- Murage, A.W., Ilatsia, E.D. 2011. Factors that determine use of breeding services by smallholder dairy farmers in Central Kenya. *Trop. Anim. Health Prod.* 43, 199-207.
- Murata, K., et al. 2014. Identification of an olfactory signal molecule that activates the central regulator of reproduction in goats. *Curr. Biol.* 24: 681–686.
- Mwacharo, J.M., Drucker, A.G. 2005. Production objectives and management strategies of livestock keepers in South-East Kenya: Implications for a breeding programme. *Trop. Anim. Health Prod.* 37: 635-652.
- Nauta, W.J. 2009. Selective breeding in organic dairy production. PhD Thesis, Wageningen Universiteit (Wageningen University); Wageningen; Netherlands, 160 pp.
- Neeteson-van Nieuwenhoven, A.M., et al. 2006. Sustainable transparent farm animal breeding and reproduction. *Livest. Sci.* 103: 282-291.
- Nunes, J.F., et al. 1982. Role of seminal plasma in the invitro survival of goat sperm. *Reprod. Nutr. Dev.* 22: 611-620.
- Okamura, H., Mori, Y. 2005. Characterization of the primer pheromone molecules responsible for the 'male effect' in ruminant species. *Chem. Senses* 30: I140-I141.
- Paillard, S., Treyer, S. 2010. Feeding the planet: two scenarios: Agrimonde and the debate on the global future for agriculture and food. *Futuribles* 45-63.
- Paillard S., T.S., Dorin B. (Ed.) 2010. *Agrimonde: Scenarios and Challenges for Feeding the World in 2050*. Éditions Quæ, Paris, pp 295.
- Pauli, G.F., et al. 2010. Occurrence of Progesterone and Related Animal Steroids in Two Higher Plants. *J. Nat. Prod.* 73: 338–345
- Pellicer-Rubio, M.T., et al. 2008. High fertility using artificial insemination during deep anoestrus after induction and synchronisation of ovulatory activity by the "male effect" in lactating goats subjected to treatment with artificial long days and progestagens. *Anim. Reprod. Sci.* 109: 172-188.
- Rekwot, P., et al. 2000a. Effects of bull exposure and body growth on onset of puberty in Bunaji and Friesian x Bunaji heifers. *Reprod. Nutr. Dev.* 40: 359-367.
- Rekwot, P.I., et al. 2000b. Influence of bull biostimulation, season and parity on resumption of ovarian activity of zebu (*Bos indicus*) cattle following parturition. *Anim. Reprod. Sci.* 63: 1-11.
- Rekwot, P.I., et al. 2004. Effects of nutritional supplementation and exposure to bulls on resumption of post-partum ovarian activity in Bunaji (*Bos indicus*) cattle. *Vet. J.* 167: 67-71.
- Ronzon T., et al. 2011. Feeding the world in 2050: key findings and hopes for policy making and agricultural research from the Agrimonde foresight study. *Food Ethics Magazine* 6(3): 17-18.
- Royal, M.D., et al. 2008. Fertility in dairy cows: bridging the gaps - Foreword. *Animal* 2: 1101-1103.

- Ruas, J.R.M., et al. 2001. The effect of different types of suckling management on ovarian activity reestablishment and on plasma levels of cholesterol, glucose, urea and progesterone in anestrus Nelore cows. *Arquivos de Ciencias Veterinarias e Zoologia da UNIPAR* 4: 9-17.
- Sankar, R., Archunan, G. 2004. Flehmen response in bull: role of vaginal mucus and other body fluids of bovine with special reference to estrus. *Behav. Processes* 67:81-86.
- Sankar, R., et al. 2007. Detection of oestrous-related odour in bovine (*Bos taurus*) saliva: bioassay of identified compounds. *Animal* 1:1321-1327.
- Shelton, M. 1960. The influence of the presence of the male goat on the initiation of oestrous cycling and ovulation in Angora does. *J. Anim. Sci.* 19: 368-375.
- Soede, N.M., Langendijk, P., Kemp, B. 2011. Reproductive cycles in pigs. *Anim. Reprod. Sci.* 124: 251-258.
- Soto Belloso, E., et al. 1997. Bull effect on the reproductive performance of mature and first calf-suckled Zebu cows in the tropics. *Theriogenology* 4: 1185-1190.
- Stumpf, T.T., et al. 1992. Weight changes prepartum and presence of bulls postpartum interact to affect duration of postpartum anestrus in cows *J. Anim. Sci.* 70: 3133-3137.
- Tauck, S.A., Berardinelli, J.G. 2007. Putative urinary pheromone of bulls involved with breeding performance of primiparous beef cows in a progestin-based estrous synchronization protocol. *J. Anim. Sci.* 85: 1669-1674.
- Tauck, S.A., et al. 2006. Resumption of postpartum luteal function of primiparous, suckled beef cows exposed continuously to bull urine. *J. Anim. Sci.* 84: 2708-2713.
- Tauck, S.A., et al. 2010. Duration of daily bull exposure on resumption of ovulatory activity in postpartum, primiparous, suckled, beef cows. *Anim. Reprod. Sci.* 118: 13-18.
- Thibier, M. 2006. Biosecurity and the various types of embryos transferred. *Reprod. Domestic Anim.* 41: 260-267.
- Thimonier, J., et al. 2000. The ram effect: an up-to-date method for the control of oestrus and ovulation in sheep. *Prod. Anim.* 13: 223-231.
- Tribout, T., et al. 2010. Estimation of genetic trends in French Large White pigs from 1977 to 1998 for growth and carcass traits using frozen semen. *J. Anim. Sci.* 88: 2856-2867.
- Ugarte, E., et al. The research and development programmes in dairy sheep in the Basque Country. *Options Mediterraneennes. Serie A, Seminaires Mediterraneens* 108: 227-235.
- Underwood, E.J., et al. 1944. Studies in Sheep husbandry in Western Australia. V. The breeding season of Merino crossbred and British Breed ewes in the Agricultural districts. *J. Dep. Agric. West. Aust.* 11: 135-143.
- Vallet, J.C., et al. 1992. Intrauterine insemination by laparoscopy in ewes and goats. *Ann. Zootech.* 41: 305-309.
- van Arendonk, J.A.M. 2011. The role of reproductive technologies in breeding schemes for livestock populations in developing countries. *Livest. Sci.* 136: 29-37.
- van Leeuwen, J.J.J., et al. 2011. Effects of altrenogest treatments before and after weaning on follicular development, farrowing rate, and litter size in sows. *J. Anim. Sci.* 89: 2397-2406.
- Wathes, D.C., et al. 2008. Factors influencing heifer survival and fertility on commercial dairy farms. *Animal* 2: 1135-1143.
- Zalesky, D.D., et al. 1984. Influence of exposure to bulls on resumption of estrous cycles following parturition in beef-cows. *J. Anim. Sci.* 59: 1135-1139.
- Zeder, M.A. 2001. A metrical analysis of a collection of modern goats (*Capra hircus aegargus* and *C. h. hircus*) from Iran and Iraq: Implications for the study of caprine domestication. *J. Archaeol. Sci.* 28: 61-79.

Agradecimientos: Quiero agradecer al Dr. José Alberto Delgadillo-Sánchez por su ayuda en la preparación de este manuscrito en español.

A FORESIGHT REFLECTION ON SUSTAINABLE METHODS FOR CONTROLLING MAMMALIAN FARM ANIMAL REPRODUCTION

ABSTRACT: Controlling farm animal reproduction was one of the essential tools for domestication. It is still of high interest for genetic improvement, adjustment of production to feed availability, to market and reduction of unproductive periods. Detection of oestrous behaviour, synchronization of conceptions and increase of the potency of diffusion of sires are three common objectives among species. The various reproductive systems among livestock systems differ because of intrinsic properties of species and because of the various degrees of intensification of these systems. Three clear tendencies are to continue increasing productivity by improving reproductive efficiency, developing new and sustainable techniques without hormones, and continuing to develop AI and reproductive biotechnologies. Future areas of investment in research could be the physiological and ethological bases of the socio-sexual inter-relationships between animals, the genetic control of reproductive traits, an increase in the efficiency of classical and new reproductive biotechnologies and engineering new and innovative reproductive techniques to be used in farm conditions. These reproductive techniques should be developed respecting the three pillars of sustainability: environment, economy and society. Thus, they should be included within the livestock systems in which they are supposed to be applied and which should be assessed for sustainability.

Keywords: Mammals, Reproduction, Sustainability