

---

# Mejoramiento Genético Bovino a través Tecnologías Reproductivas de Avanzada

---

## **H. William Vivanco Mackie**

Ingeniero Zootecnista, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.  
MSc. PhD. Reproducción y Mejoramiento Genético Animal,  
California State Polytechnic University, USA.

Director de Tecnología Reproductiva Animal y Unidad de Desarrollo de Tecnología del Instituto de Investigación Agrícola,  
Nueva Zelanda.

Director, Gerente y Jefe de Investigación y Desarrollo de Operaciones Técnicas, South Pacific Biotech, Australia.  
2/32 Annesley Street, Echuca, Victoria, 3564, Australia.

[wvivanco@spbiotech.com.au](mailto:wvivanco@spbiotech.com.au)

**Australia**

## Introducción

Después de la exitosa adopción de la inseminación artificial (IA), como método reproductivo e instrumento de mejora animal por la industria ganadera mundial, prácticamente han transcurrido 50 años sin que se haya producido una revolución tecnológica de similar potencial.

Ese vacío tecnológico ha sido llenado en los últimos 5 años con el nacimiento de la industria de producción de embriones in vitro (en laboratorio). La transformación de la técnica de producción de embriones en laboratorio, una técnica fundamentalmente de investigación básica, utilizada sólo en laboratorios de investigación, a una tecnología de aplicación industrial, constituye el hito tecnológico más importante y de mayor impacto potencial en la ganadería desde la aparición de la inseminación artificial.

El logro tecnológico que constituye el poder cosechar ovocitos directamente de los ovarios de las hembras, madurarlos en laboratorio, capacitar espermatozoides en laboratorio y controlar el proceso de fertilización y de desarrollo inicial de los embriones resultantes, ha abierto un enorme campo de posibilidades para la construcción de ganaderías más eficientes en el futuro.



La producción de embriones in vitro no sólo es importante por su impacto directo en la reproducción y mejoramiento genético animal, sino también porque es a partir de esta tecnología, actuando como “centro o eje”, que se han podido desarrollar tecnologías aun más avanzadas, tales como la transferencia nuclear utilizada en la clonación de embriones a partir de células embrionarias, clonación de fetos y de animales de cualquier edad y aun de animales beneficiados (carcasas) a partir de células somáticas.

Los avances en biología molecular, citometría de flujo y criobiología permiten hoy en día combinar sus desarrollos con la tecnología de producción de embriones in vitro para lograr la producción de crías de **“sexo y composición genética pre-determinada de acuerdo con las necesidades del mercado”**, así, las técnicas de sexado de embriones, sexado de semen, selección asistida por marcadores genéticos, incorporación o sustracción de genes (transgénesis) en cultivos celulares para clonación o directamente en embriones, y la criopreservación de gametos y de embriones, forman parte de los paquetes tecnológicos disponibles para la optimización de la eficiencia productiva (productividad) de los animales.

La productividad animal es entendida principalmente como la eficiencia con la cual los animales transforman los alimentos que consumen en productos animales para beneficio del hombre. Esta eficiencia depende en gran medida de la composición genética del animal mismo y de la interacción de sus genes con el medio ambiente que le proveemos (alimentación, manejo, sanidad, influencias del clima, etc.). La eficiencia de producción de leche de una vaca en particular, por ejemplo, depende de su propia habilidad genética para transformar en leche de la calidad deseada los alimentos que se le ofrecen, esta habilidad puede expresarse en menor o mayor grado dependiendo del medio ambiente bajo el cual el animal viva y produzca.

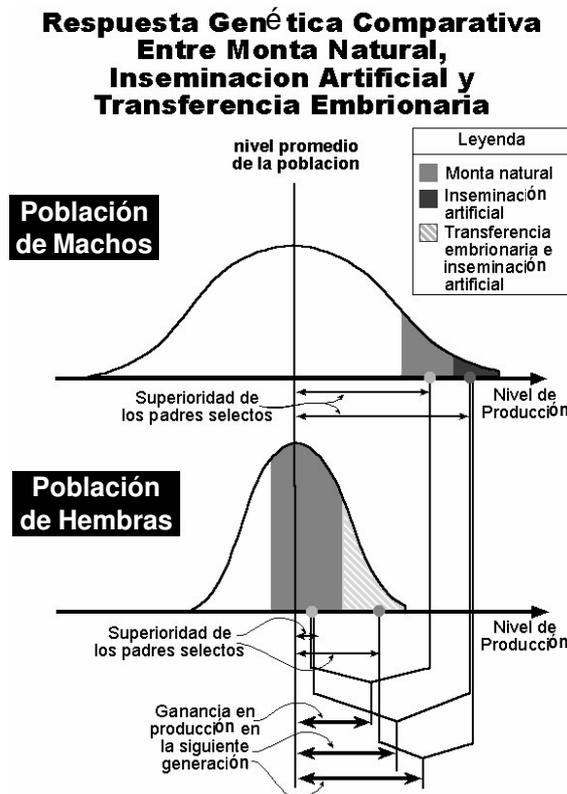
Tanto en el caso de un individuo, como en el caso de toda una población animal, la proporción (frecuencia) de genes deseables para la producción de un determinado producto animal en relación con la proporción de los genes indeseables para la producción de dicho producto animal, va a determinar la habilidad genética para producir eficientemente el producto deseado (leche, carne, lana, etc.).

El ritmo al cual nosotros podemos incrementar la frecuencia de genes deseables en nuestros animales determina el ritmo al cual incrementaremos la productividad animal cualquiera que sea el producto animal en que estemos trabajando.

El ritmo de cambio en la frecuencia de genes depende de la adecuada selección de los padres de las siguientes generaciones, pero también de la intensidad con la que estos animales selectos se usen para generar los reproductores del futuro, la intensidad con la que podemos distribuir los genes selectos

depende de la tecnología reproductiva que usemos, por ello, mejoramiento ganadero, en el sentido amplio de la palabra, es el arte de combinar la genética y la reproducción. La figura 1 muestra la influencia de las diversas tecnologías reproductivas en el ritmo de progreso genético.

**Gráfica 1**  
**Influencia de las tecnologías reproductivas en el progreso genético**



## 1. Factores Determinantes en el Ritmo de Incremento de la Productividad Animal

El ritmo o tasa anual de ganancia genética (incremento en la producción anual debido a cambios en la composición genética de los animales) esta determinado por los efectos de los siguientes factores:

- a. **La intensidad de selección**, la cual depende de la proporción de animales de la población total que son seleccionados como reproductores (padres de la futura generación). Bajo sistemas de reproducción convencional en que se produce un limitado número de crías por animal reproductor, se requiere (en el caso de las hembras madres) casi todo el rebaño para producir las hembras de reemplazo (hembras de la siguiente generación), o sea no hay mucha posibilidad de seleccionar las madres, en este caso la intensidad de selección será baja. Si en cambio podemos lograr que cada



hembra de reproducción tenga varias crías al año, entonces necesitaremos sólo las hembras de mayor productividad como madres de la siguiente generación, es decir, nuestra selección de madres puede ser más intensa. Lo mismo ocurre en la selección de padres. Con el uso de inseminación artificial es posible lograr muchas crías por padre selecto, por lo que podemos seleccionar no a todos los animales de la población sino sólo a los animales muy superiores de la población como padres de la generación siguiente, luego necesitaremos menos padres y la intensidad de selección será maximizada. En conclusión, mientras menor sea la proporción de animales de la población total que es seleccionada como progenitores de la siguiente generación, mayor será la intensidad de selección y mayor el progreso genético.

- b. La precisión de la selección**, la cual depende de los métodos que usemos para encontrar (identificar) a los animales superiores. La precisión de selección es la medida del grado de coincidencia o correlación entre nuestra estimación del valor genético de un animal y su valor genético real o habilidad genética real para producir eficientemente determinado producto animal. La mayor precisión para estimar el valor genético de un animal se logra cuando se usan los datos de los parientes directos en adición a los propios datos de comportamiento del animal, para el caso de características expresadas en el propio individuo, y sólo por los datos de parientes directos en el caso de características no expresadas en el propio individuo (por ejemplo determinación en machos de su habilidad transmisora para producción lechera).

La precisión varía no sólo de acuerdo con el método de evaluación genética utilizado, sino también de acuerdo con el número de datos utilizados del propio individuo o número de descendientes o parientes incluidos en la evaluación. A mayor cantidad de información, mayor confiabilidad en la prueba.

- c. La variabilidad genética**, que existe en la población para la determinada característica productiva en cuestión. Si no hay variación no hay posibilidades de selección, todos los animales serían iguales. La heredabilidad de una determinada característica es la proporción de la variabilidad total observada entre individuos para ese carácter, que es debida a efectos genéticos aditivos o transmisibles, por lo tanto, la heredabilidad es un buen estimador de la variabilidad genética. A mayor heredabilidad, mayor posibilidad de cambio genético en la población para la característica productiva seleccionada. La heredabilidad de la producción de leche (volumen) es de alrededor de 0.25, la heredabilidad de ritmo de crecimiento es de alrededor de 0.35, etc.
- d. El intervalo entre generaciones:** El progreso genético se expresa en el tiempo, es decir, si apareamos dos animales hoy el efecto en la productividad no se expresará sino hasta que la cría de ese apareamiento



miento haya nacido, crecido y este en producción; así mismo el apareamiento de los animales seleccionados se hace una vez que estos sean hábiles para reproducirse, y aun cuando hayan alcanzado la edad de reproducción, los animales no se usan para reproducción sino hasta después de haber concluido el proceso de evaluación y selección genética. En el caso de toros lecheros, por ejemplo, la edad a la que un toro es seleccionado definitivamente, se declara como «probado» y se usa masivamente en la inseminación artificial, es de alrededor de 5 años. En el caso de las vacas, estas son inseminadas por primera vez a la edad de 15 a 18 meses y producen su primera cría a los 24 o 27 meses. Por lo que en el caso de apareamiento de un toro probado con una vaquillona de primer servicio, la cría nace cuando el toro tiene más de 5 años y la madre más de 2 años, por lo que en promedio la edad de los padres es de 4 años al momento de nacer la cría. Esto es lo que se conoce como **intervalo entre generaciones** y se define precisamente como la edad promedio de los padres (padre y madre) al momento de producirse el nacimiento de la cría. Cuanto más avanzada sea la edad de los padres al momento de nacimiento de la cría, menor será el ritmo de progreso genético por unidad de tiempo, ya que la cría es la única que podrá expresar (cuando entre en producción) la combinación genética para mayor productividad, que se espera haya heredado de los padres. Por lo tanto, un factor de gran influencia en el ritmo de mejora animal por unidad de tiempo (por año por ejemplo), es la edad a la que los animales producen sus crías.

La intensidad de selección, la precisión de selección y la variabilidad genética son factores que afectan la tasa de mejora genética en forma directa, mientras que el intervalo generacional la afecta en forma inversa, tal como se expresa en la ecuación siguiente:

$$\text{Ganancia Genética Anual} = \frac{\text{Intensidad de selección} \times \text{Precisión de selección} \times \text{Variabilidad genética}}{\text{Intervalo entre generaciones}}$$

Es decir, que a mayor intensidad de selección, mayor precisión de selección y mayor heredabilidad (o variabilidad genética), mayor será también el ritmo de ganancia genética siempre y cuando se mantenga el intervalo generacional lo más corto posible. Si el intervalo generacional es largo se pierden los logros alcanzados con una buena selección.

Un aspecto fundamental a tenerse en cuenta es que el valor genético de la cría es el promedio del valor genético de los padres (ambos, padres y madres):

$$\text{Valor Genético de la cría} = \frac{\text{Valor Genético del padre} + \text{Valor Genético de la madre}}{2}$$

Por esto, si se desea un máximo progreso genético por generación, la selección deberá ser tan intensa en el lado paterno como en el materno. Sin embargo, en la actividad ganadera convencional esto es



prácticamente imposible de alcanzar, porque en el ganado vacuno normalmente se tienen que utilizar como madres de la siguiente generación entre el 75 y el 80% de la población de vacas (asumiendo que el descarte anual del 20 al 25% se deba exclusivamente a razones de baja productividad), para asegurar el nacimiento de suficiente número de hembras de reemplazo, mientras que sólo se usa del 3 al 4% de la población de machos como padres de la siguiente generación (en monta natural), pudiéndose seleccionar más intensamente la población de padres si se aplica la inseminación artificial. Esto es así porque cada vaca sólo produce en promedio 0.75 crías por año, de tal manera que en un establo de 100 vacas se producen 75 crías, 37 de las cuales son terneras, debiéndose retener al menos 25 para cubrir los reemplazos, por lo que las posibilidades de hacer selección de madres son muy limitadas.

La única forma de lograr una alta intensidad de selección en las madres de la generación siguiente es logrando producir más de una cría por madre al año. Así, si se quisiera utilizar solo el 10% superior de las vacas como madres de la siguiente generación, cada vaca selecta deberá producir 3 crías hembras, es decir 6 crías al año (considerando que el 50% serán machos).

El gran reto de lograr que el aporte genético de las madres sea tan superior al aporte genético de los padres, de manera tal que el valor genético de la cría (promedio de ambos padres) se incremente prácticamente al doble del ritmo que se ha venido logrando con la inseminación artificial (Lohuis, 1995), es lo que ha motivado el desarrollo de nuevas tecnologías reproductivas, la gran mayoría de ellas encaminadas a maximizar el uso de las hembras como recurso genético.

El impacto de las nuevas tecnologías reproductivas no está limitado solamente a su papel dentro los sistemas de selección y mejora genética animal, sino que éstas han abierto las posibilidades de implementar sistemas de producción totalmente nuevos y más eficientes, imposibles de lograr sin el uso de ellas.

## 2. Breve Descripción de las Nuevas Tecnologías Reproductivas

La inseminación artificial se basa fundamentalmente en la maximización del uso de machos de alto valor genético, es decir, en el incremento de la tasa reproductiva de los machos (por ejemplo un toro o un carnero por monta natural sólo pueden producir alrededor de 50 a 100 crías por año, mientras que por inseminación artificial se logran en promedio más de 30,000 crías por toro probado por año). El hecho de que un sólo macho puede producir un gran número de crías permite usar solo los machos muy superiores, es decir, permite aumentar la presión de selección en la población de machos.

El progreso genético logrado con la inseminación artificial (1.5% por año) se puede incrementar aún



más, si además de la alta presión de selección en los machos (usando sólo los de mayor nivel en sus pruebas de progenie o de comportamiento), se usan técnicas reproductivas que aumenten la tasa de reproducción de las madres de los machos (es decir que cada madre pueda tener más de una cría por año), de manera tal que se pueda incrementar la intensidad de selección en la población de las madres de los machos selectos. Para ilustrar esto con un ejemplo veamos el caso de los principales centros de producción de semen en Nueva Zelanda y Australia:

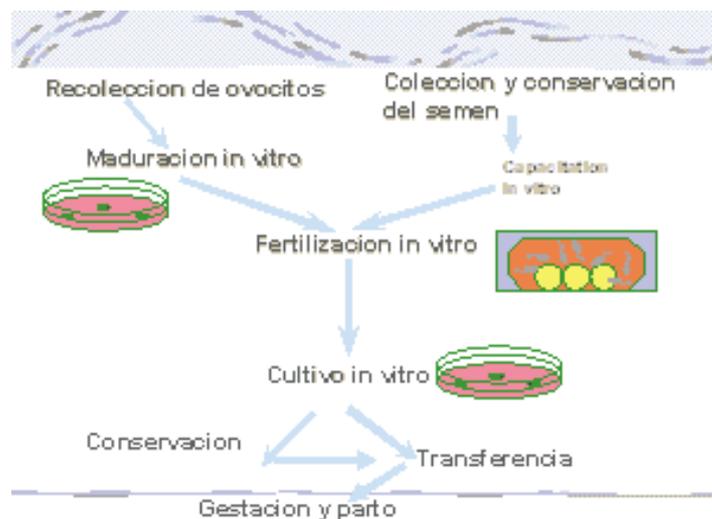
En ambos países, anualmente, se requiere la introducción de 300 terneros dentro del esquema de pruebas de progenie, de tal manera que en 5 años se gradúen como “probados” alrededor de 30 toros. Para producir 300 terneros (machos) al año, se requiere seleccionar 750 vacas madres (debido a que algunas no quedarán preñadas a tiempo y el 50% de las que se preñan producirán crías hembras) las cuales son seleccionadas de la población total y se inseminan con semen de los mejores toros probados. Pero no hay garantía de que las mejores vacas de esas 750 sean las que produzcan un ternero macho, la mejor vaca pudo no quedar preñada o pudo producir una cría hembra. Si nosotros pudiéramos garantizar que cada una de las madres seleccionadas estará representada con un ternero macho al pie, no necesitaríamos seleccionar 750 madres sino sólo las mejores 300 madres, es decir, estaríamos duplicando la presión de selección en la población de madres de toros. Para poder garantizar que cada una de las 300 mejores vacas tendrá una cría macho se tiene que «incrementar la tasa reproductiva de las madres seleccionadas», es decir, producir más de una cría al año de cada madre, de tal manera que por lo menos una sea macho, o producir crías cuyo “sexo se ha predeterminado” ya sea al momento de fertilización (usando semen sexado) o en el estado embrionario (haciendo sexado de embriones antes de transferirlos) para poder garantizar el nacimiento de un ternero macho por vaca selecta. La presión de selección de madres de toros podrá incrementarse aún más en proporción al número de crías macho que podamos producir por madre selecta por año.

El incremento de la tasa reproductiva de las madres seleccionadas se puede lograr usando la tecnología de transferencia de embriones, mediante:

- a. **La tecnología convencional de producción y transferencia de embriones** abreviada MOET (que se origina de la abreviación en inglés de la expresión “Multiple Ovulation and Embryo Transfer»). Esta tecnología de MOET consiste en inyectar hormonas a las madres seleccionadas para inducir superovulación, y luego de inseminarlas lavar los embriones del útero (normalmente se logran 4 a 5 embriones) y transferirlos a hembras recipientes que gestarán y parirán por lo menos 2 o 3 crías (al menos una de ellas se espera que sea macho).
- b. **Las nuevas tecnologías reproductivas de colección de ovocitos, maduración y fertilización de**

**ovocitos in Vitro, cultivo de embriones y transferencia embrionaria** conocida como la tecnología de producción de embriones in vitro (gráfica 2) o “IVP” (abreviado de la expresión en inglés “In Vitro Embryo Production») que permite la producción de embriones dos veces por semana y rinde en vacunos en promedio 2 embriones por semana por vaca donante (Vivanco, 2000). En cambio, la tecnología convencional de MOET permite la recolección de embriones sólo cada 60 días, debido a la necesidad de tratamientos hormonales. La tecnología de IVP permite insistir recolectando embriones de las vacas donantes hasta que se logren suficientes preñeces que garanticen el nacimiento de por lo menos un ternero macho. Una manera de optimizar el sistema, tanto en la alternativa de MOET como en la de IVP, es la de usar espermatozoides sexados (tecnología aún en etapa de desarrollo, no disponible comercialmente) o la de sexar los embriones por análisis de contenido de ADN (disponible comercialmente) y transferir sólo los embriones macho.

**Gráfica 2**  
**Esquema de la tecnología de producción de embriones “in vitro”**



La utilización de tecnologías reproductivas avanzadas para incrementar la presión de selección de las madres de machos para prueba de progenie, a través del incremento de la tasa reproductiva de las madres y la predeterminación del sexo de la cría, se conoce como la «ruta hembra-macho», es decir, utilizar alta tecnología reproductiva en hembras para producir machos selectos que una vez probados se usaran como padres de las futuras generaciones.

En Nueva Zelanda, Australia, Holanda, Canadá, Francia, El Reino Unido, Japón y los EEUU se vienen



aplicando ya las nuevas tecnologías reproductivas de IVP y sexado de embriones en la «ruta hembra-macho» generando los toros jóvenes que se requieren para los esquemas de pruebas de progenie. El impacto genético de esta medida en Nueva Zelanda, ha sido estimado en un incremento del 16% en la ganancia genética anual sobre la ganancia actual obtenida con el uso de toros probados, es decir, la producción se eleva anualmente a un ritmo de 1.75% sobre el promedio de la población en lugar de 1.5% logrado con el uso de toros probados generados sin el uso de transferencia embrionaria. En términos económicos, esto significa para la industria lechera de Nueva Zelanda más de ochocientos mil dólares de ingreso neto adicional por año.

Si una parte de las madres de los futuros toros probados (20% de las madres selectas) fueran terneras de 2 meses de edad y no vacas adultas, el intervalo generacional se reduce enormemente, y aunque en ocasiones se pierde algo en la precisión de selección (ya que no se tienen datos de producción de la misma ternera sino que se selecciona a las terneras donantes con base en los datos de sus padres), el ritmo de ganancia genética anual se incrementa en 22% sobre la tasa de ganancia genética anual que se logra con el uso de toros probados, en lugar de aumentar a un ritmo de 1.5% sobre el promedio de la población se estaría aumentando a un ritmo de 1.83%. Esto resulta en un incremento en el ingreso neto para la industria lechera de Nueva Zelanda de 1.2 millones de dólares al año. La utilización de terneras de alto valor genético como madres de toros es posible mediante el uso de la tecnología de IVP, recolectando ovocitos de los ovarios de las terneras, ya sea por técnica transvaginal con ayuda de ecosonografía, por laparoscopia o por laparotomía, fertilizando los ovocitos in vitro, cultivándolos hasta el estadio adecuado (blástula) y transfiriendo los embriones a recipientes adultas, las cuales gestan y paren los terneros crías de terneras. Las crías de la ternera nacerán cuando la ternera cumpla 11 meses de edad, esto comparado con la reproducción natural, en la que la primera cría de una vaca nace en promedio cuando la vaca tiene de 24 a 27 meses, muestra una dramática reducción del intervalo generacional. La utilización de terneras como madres de futuros toros probados es factible sólo usando la tecnología de IVP, no es posible con la tecnología de transferencia embrionaria convencional (MOET).

La relación costo/beneficio de la aplicación de las nuevas tecnologías reproductivas que conforman el sistema de IVP (producción de embriones in Vitro), es decir, la recolección de ovocitos (ya sea de animales post púberes y/o terneras), la maduración y fertilización in vitro y el cultivo y transferencia a recipientes adultas para su gestación y parto, con el fin de producir terneros para los programas de prueba de progenie (“ruta hembra-macho”) es positiva para las condiciones económicas de Nueva Zelanda y está en pleno uso comercial. En otros países desarrollados tales como Holanda (Holland Genetics), Inglaterra (GENUS), Italia (CIZ), Francia (UNCEIA), Canadá (DELTA) y USA (Em Tram) se viene aplicando esta tecnología en forma comercial por las compañías referidas en paréntesis.

En el caso de usar las tecnologías de producción y transferencia de embriones para la generación de



terneros machos (“ruta hembra-macho”), para su uso en inseminación artificial o en monta natural, el costo de producir el macho selecto es distribuido entre la gran cantidad de crías que éste generará cuando entre en reproducción, el beneficio lo constituye el valor adicional de la producción obtenida. En Nueva Zelanda el costo de equilibrio al nacimiento de un ternero a ser incorporado en el esquema tradicional de prueba de progenie es de 4 mil dólares neocelandeses, es decir, que podemos gastar hasta 4 mil dólares neocelandeses para generar un ternero macho que será usado para entrar al grupo de machos para la prueba de progenie. El costo actual de producir vía IVP el ternero macho al nacimiento es de alrededor de 700 dólares, lo que está muy por debajo del costo de equilibrio.

Las nuevas tecnologías reproductivas se utilizan también para la generación de hembras de reemplazo, es decir, seleccionar hembras y reproducirlas intensivamente para producir hembras. Esta ruta de aplicación de las tecnologías reproductivas la llamamos la “**ruta hembra-hembra**”. La aplicación de las tecnologías de IVP o de MOET en la “ruta hembra-hembra” como método para generar hembras de reemplazo (la futura generación de productoras) tiene un potencial y un impacto económico mucho mayor para la industria ganadera que la ruta hembra-macho, generando un incremento mayor en la productividad y por lo tanto en el valor total de la producción; sin embargo la relación costo/beneficio de la aplicación de las nuevas tecnologías reproductivas usando esta ruta hembra-hembra, puede ser muy diferente entre países, dependiendo de los niveles de precios en cada país y de la composición genética de las poblaciones ganaderas. La relación costo/beneficio depende de cuán costosa sea la aplicación de la tecnología y de la relación de este costo con el valor que tenga el producto (leche, carne, animal de reproducción) en ese país. La magnitud del ingreso adicional obtenido dependerá del precio de los productos y de la variabilidad genética particular existente en cada hato (por lo que la relación beneficio costo puede ser diferente incluso para cada hato en particular) que permita una diferencial de selección significativa (diferencia en producción entre los animales selectos y el promedio del hato) y la presión de selección que se ejerza para seleccionar las madres de las futuras hembras. Para ilustrar esto veamos el caso de Nueva Zelanda:

En Nueva Zelanda, la reproducción del ganado lechero es manejada en forma estacional debido al sistema de producción eminentemente pastoril. Las vacas deben parir cuando la producción de pastos es máxima (primavera) y deben secarse cuando la producción de pastos es mínima (invierno). Las inseminaciones se realizan por lo tanto una vez al año y en un período restringido. Los productores reemplazan en promedio del 20 al 25% de las vacas por año, por lo que necesitan retener el 30% de las terneras anualmente para criarlas como vacas de reemplazo. En un establo típico de 100 vacas en ordeño, el productor insemina con semen de toros probados positivos hasta que logra 60 vacas preñadas (esto le garantiza que tendrá por lo menos 30 terneras nacidas), luego todas las vacas que no resultaron preñadas a la inseminación o que no estuvieron en celo durante la temporada de insemina-



ción son puestas en monta natural con toros de carne y producirán animales para beneficio. Es decir que las terneras de reemplazo son hijas de las vacas que entraron en celo y se preñaron más temprano dentro de la temporada de inseminación (65 días) sin importar cuál vaca haya sido la que entró en celo y se preñó. Es decir, no hay selección de madres de vacas, es totalmente al azar cuál vaca preña más temprano y tiene una cría hembra. En consecuencia, el progreso genético a obtenerse en la generación siguiente depende casi exclusivamente de la acción mejoradora de los toros probados, o sea que el aporte genético de las hembras está totalmente sub-utilizado. Siendo la cría el efecto promedio de los padres, si queremos aumentar al máximo la respuesta (nivel de producción) a la selección en la siguiente generación, es necesario incrementar la presión de selección en las madres de las terneras de reemplazo, para ello no hay otra alternativa que la de incrementar la tasa reproductiva de las madres (producir más de una cría por madre), de manera que cada madre selecta tenga por lo menos una cría hembra.

Modelos matemáticos desarrollados por nosotros (Vivanco, 1997) han establecido el impacto que la selección de las madres, para producir terneras de reemplazo tendrá sobre la producción lechera en Nueva Zelanda. El cuadro 1 compara la ganancia genética por año en la producción lechera cuando: **a)** Se usa el sistema tradicional de reproducción de Nueva Zelanda reteniendo como terneras de reemplazo las terneras nacidas más temprano en la estación de parición, sin importar de que madre vengan. Esto equivale a una selección del 75 al 80% de las vacas como madres potenciales de las terneras de reemplazo (ya que cada año se descarta a camal entre el 20 y el 25% del hato; **b)** Cuando seleccionamos las madres de tal forma que cada madre seleccionada esté representada por una ternera nacida (seleccionamos tantas madres como terneras de reemplazo necesitamos), esto requiere la aplicación ya sea de MOET o de IVP para asegurar que cada madre seleccionada esté representada por una cría hembra, lo que equivale a seleccionar entre el 25 al 30% de las vacas superiores como madres de la futura generación; y **c)** Cuando aplicamos alta presión de selección, por ejemplo producir las terneras de reemplazo utilizando como madres las vacas que están en el 10% superior del hato, es decir que cada vaca seleccionada nos tendrá que producir entre 2.5 y 3 terneras por año, obviamente vía MOET o IVP. En el caso descrito en b) y c), para las condiciones de Nueva Zelanda y Australia lo que se ha venido haciendo es utilizar IVP, recolectando los ovocitos de las mejores vacas apenas cumplen 30 días post parto (no importa si entraron en celo o no, los ovocitos están presentes en los ovarios aún cuando las vacas no hayan mostrado celo post parto), los embriones generados por IVP y sexados son transferidos 7 días postcelo a las vacas del mismo hato, pero de menor valor genético que vienen entrando en celo (por lo general las de menor producción entran en celo más temprano) y que sirven como recipientes. En esta forma, las terneras son hijas de las mejores vacas y nacen temprano en la estación de parición, por lo que tienen posibilidad de desarrollarse lo suficiente para ser servidas en la siguiente



estación reproductiva.

El valor neto de la producción adicional obtenida por la industria lechera neocelandesa es de 11 millones de dólares por año para el caso de selección del 30% de vacas como madres de las terneras de reemplazo y de 29.6 millones de dólares por año para el caso de seleccionar sólo el 10% superior como madres de las terneras de reemplazo.

El incremento en producción por año para cada intensidad de selección descrito en el cuadro 1 es específico para la población de ganado de Nueva Zelanda, otras poblaciones de ganado podrán experimentar un incremento mucho mayor o menor dependiendo de la variabilidad genética que exista, de cuan precisa sea la identificación de las madres superiores y de cuan eficiente sea la reproducción

**Cuadro 1**

**Ganancia genética anual calculada para la población de ganado vacuno lechero Holstein, Friesian y Jersey en Nueva Zelanda de acuerdo con la proporción de vacas del establo seleccionadas como madres de las terneras de reemplazo (de acuerdo con intensidad de selección). En todos los casos los padres son toros probados positivos**

Intensidad de selección de madres de terneras de reemplazo	Ganancia genética anual en Kg de leche por campaña		Ganancia genética anual en Kg de grasa por campaña		Ganancia genética anual en Kg de proteína por campaña	
	Holstein	Jersey	Holstein	Jersey	Holstein	Jersey
Descartando el 20% de las vacas. Cualquiera del resto de vacas (80% del hato) puede ser madre de las terneras de reemplazo	21.45	25.12	1.59	1.67	1.23	1.42
Utilizando el 30% superior del hato como madres de las terneras de reemplazo (producir una ternera por vaca seleccionada)	25.33	29.71	1.84	1.96	1.42	1.65
Utilizando el 10% superior del hato como madres de las terneras de reemplazo (producir 3 terneras por vaca seleccionada)	26.67	31.3	1.93	2.06	1.49	1.73



(intervalos generacionales cortos) en sus poblaciones ganaderas.

Estimaciones hechas por otros autores sobre el impacto de la utilización de nuevas tecnologías reproductivas (producción de embriones *in vitro* y transferencia embrionaria) en la “ruta hembra-hembra” (incremento de la tasa de reproducción de las hembras selectas para producir hembras de reemplazo) muestran un incremento en la tasa de ganancia genética anual entre 50 y 100% sobre la tasa obtenida con inseminación artificial con toros probados en ganado lechero (McClintock y Nicholas, 1990) y un incremento entre 200 y 300% en la tasa de ganancia genética anual sobre la tasa obtenida por monta natural con carneros selectos en ovinos (Steane et. al, 1988).

La simulación matemática de la aplicación de la tecnología reproductiva de colección de ovocitos y producción de embriones “*in vitro*” se realiza para 4 estrategias de reproducción en la población de ganado lechero de Nueva Zelanda (Smeaton y Vivanco, 2001). La primera con base en “*estatus quo*”, es decir, usando IA en el hato con toros probados y reteniendo como reemplazo las terneras que nacen más temprano (el 80% de las vacas del hato son madres potenciales de las terneras de reemplazo). La segunda alternativa utilizando como madres de las terneras de reemplazo a las vacas que están en el 25% superior del hato, aplicando IVP y usando toros del mismo nivel genético que en el *status quo*. La tercera alternativa usando como madres de terneras de reemplazo al 25% superior de las vaquillonas de primer empadre, vía IVP y con semen del mismo nivel del *status quo*. La cuarta alternativa utilizando como madres de las terneras de reemplazo, vía IVP, al 25% superior de las terneras pre puberes y semen de toros del mismo valor genético que en el *status quo*. Se pudo establecer que la influencia del intervalo generacional en el ritmo de progreso genético, así como el efecto de la intensidad de selección, siendo mayor el progreso genético por unidad de tiempo cuanto más jóvenes son las madres y cuando se usan madres que son las del más alto nivel genético en relación con el resto de vacas del hato.

La relación beneficio costo para la ruta “hembra-hembra” a nivel de productor individual y si se considera el incremento en valor de la producción (en leche o sólidos de leche, grasa, proteína) varía enormemente entre países, pero en forma general se debe tener en cuenta que existen 2 caminos para incrementar la relación beneficio/costo de la aplicación de estas tecnologías: **a)** Aumentar la presión de selección en las madres, lo cual resultará en una mayor ganancia genética y por lo tanto mayor valor total de la producción incrementada, y **b)** Reducir los costos de producción por cría generada con la aplicación de las nuevas tecnologías reproductivas (MOET, IVP). La reducción de costos será obtenible principalmente incrementando la eficiencia de producción de embriones (número de embriones obtenidos por sesión de colección de ovocitos o por sesión de lavaje uterino de embriones). El cuadro 2 muestra la eficiencia promedio por sesión obtenida en nuestros laboratorios para la tecnología de



**Cuadro 2**  
**Producción promedio de embriones transferibles por sesión por vaca para la tecnología de colección de ovocitos de donantes vivas por método transvaginal, y subsiguiente producción de embriones in vitro**

No. de vacas	No. de sesiones	Promedio de ovocitos/vaca/sesión	Promedio de embriones transferibles por vaca por sesión	% de embriones transferibles sobre total de ovocitos colectados
28	146	6.68	2.02	30.23%

colección de ovocitos de vacas donantes vivas por método transvaginal y subsiguiente producción de embriones in vitro.

La eficiencia promedio de MOET es de 5 embriones por colección. El intervalo entre colecciones para IVP es de 3 días pudiéndose colectar 48 semanas al año e incluso en animales preñados hasta los 90 días de preñez. El intervalo de colecciones de MOET es de más de 60 días pudiéndose colectar en promedio 6 veces por año. Comparativamente con IVP se pueden producir en promedio 160 embriones por vaca por año, mientras que con MOET sólo se pueden lograr alrededor de 30 embriones. En ambos casos estos rendimientos asumen que las vacas donantes se dedican exclusivamente a la producción de embriones todo en año, sin gestar su propia cría.

Ambos objetivos, aumentar la presión de selección en las madres y reducir los costos de producir las crías usando estas tecnologías, podrían lograrse ya sea utilizando **espermatozoides sexados** (Arlotto et al 1996) (ver esquema de la tecnología en la figura 4) para fertilizar los ovocitos con espermatozoides X o Y dependiendo del sexo de interés y/o mediante la **“clonación de embriones sexados”**. Ambas tecnologías están aún a nivel de desarrollo y no han alcanzado eficiencia comercial. Obviamente, la organización de la producción tendrá que hacerse de manera que se mantenga la variabilidad genética en los hatos de crianza de reproductores (“Hatos Núcleo Elite”), donde se generaran los embriones utilizando como madres y padres los animales del 1 ó 2% superior del hato élite. Los embriones luego de ser sexados no sólo servirán para producir la siguiente generación de reproductores del hato élite, sino que se multiplicarán vía clonación produciendo largas cantidades de copias idénticas. Estos embriones clonados serán transferidos en las vacas de los establos comerciales o de centros especializados en producir las terneras de reemplazo para el hato comercial; dichas terneras tendrán el mismo

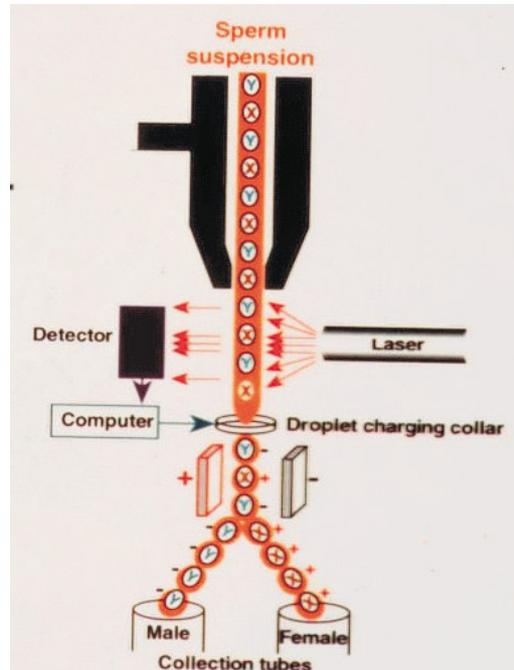


nivel genético que las vacas en los establos élite de cría de reproductores, y una vez que entren en producción tendrán una producción alta y homogénea (menos variabilidad entre vacas). La clonación de embriones reducirá significativamente el costo de producción del embrión sexado y por ende el costo del ternero nacido, ya que la mayoría de los costos de producción de terneros con las nuevas tecnologías reproductivas son los costos fijos de la producción de embriones por sesión de colección de ovocitos, por lo que un aumento en el número de embriones producidos por sesión de colección de material genético reducirá marcadamente el costo de producción por embrión.

En el caso de Nueva Zelanda, nuestras estimaciones indican que podremos lograr un costo al nacimiento de 300 dólares neocelandeses por cría de sexo predeterminado mediante la clonación de embriones sexados, aplicando esta biotecnología a un nivel de selección del 2% superior a las hembras como madres de las terneras de reemplazo, el cual es menor que el costo del equilibrio (371.82 dólares neocelandeses). En los trabajos de clonación embrionaria que venimos desarrollando (Vivanco et al 2000a) tenemos terneros nacidos usando esta tecnología. Todos los terneros nacieron vivos, en forma natural y son perfectamente normales en todo su comportamiento fenotípico (peso al nacimiento, ganancia diaria, etc.). La aplicación de la clonación de embriones para producir terneras para la industria a partir de embriones de los hatos élite para el caso de Nueva Zelanda y Australia está calculado que incrementará en un 125% el promedio de producción por hato industrial en la primera generación: en las generaciones siguientes este incremento será mucho menor (al nivel normal esperado para la presión de selección determinada en los hatos élite) calculado entre 3 y 5%.

La clonación de embriones además de permitir el incremento en la presión de selección y reducir los costos de producción de terneros, tiene otras aplicaciones en mejoramiento genético. La producción de grupos o “sets” de machos probados idénticos de alto valor genético vía clonación embrionaria es vista como una forma de difundir genes mejorantes por monta natural en sistemas pastoriles, donde el uso de la inseminación artificial sea logística, técnica o económicamente difícil. Esto facilitará el mejoramiento genético de animales en sistemas extensivos, lográndose cubrir un número significativo de hembras con “el mismo macho” (genéticamente) y producir suficiente número de crías para pruebas de progenie, esto también permite tener crías por monta natural “del mismo macho” en diferentes

**Gráfica 3**  
**Esquema de la tecnología de secado de espermatozoides por citometría de flujo**



ambientes, al mismo tiempo que se hace posible el cálculo de factores de corrección por ható o rebaño en las pruebas de evaluación genética.

En un país como Nueva Zelanda que no tiene necesidad de expandir su industria lechera, una vez que se han cubierto las necesidades de terneras de reemplazo, no hay necesidad de producir más hembras de raza lechera, por lo que los vientres de los establos lecheros se utilizan para producir ganado de beneficio. Actualmente, como se mencionó arriba, luego de obtenerse el 60% de las vacas del ható preñadas por inseminación (lo que garantiza la producción de 25% de terneras de reemplazo), el resto del ható (40% de las vacas) son servidas con toros de razas de carne. Tanto las crías macho Holstein no usadas para prueba de progenie, como las crías hembra y macho del cruce Holstein x ganado de carne son criadas hasta la edad de beneficio y son destinadas a camal hasta los 24 meses de edad. Las crías macho Jersey y las crías del cruce Jersey x ganado de carne, especialmente las hembras, no tienen en cambio un alto valor comercial como ganado de carne y por lo tanto son beneficiadas prácticamente al nacimiento (a los 3 días de edad). Anualmente más de 800 mil terneros producidos en los establos lecheros se benefician al nacimiento. Las nuevas tecnologías reproductivas son un instrumento para la **creación de nuevos sistemas de producción** en Nueva Zelanda utilizando los vientres de la industria



lechera. Embriones sexados de cruces Cebú x Holstein o Jersey son transferidos para la producción de terneras de exportación para países tropicales. Los vientres de los hatos lecheros no destinados para la producción de propios reemplazos también pueden ser usados para recibir embriones sexados de Holstein o Jersey para la producción de terneras lecheras para programas de expansión o de exportación. Embriones macho sexados de razas cárnicas, ya sea puras o compuestas, son transferidos en vacas lecheras dentro del sistema de producción llamado “Beef from Dairy” (producción cárnica en el hato lechero). La clonación de embriones una vez llegue a un nivel de eficiencia comercial, podrá producir grandes cantidades de embriones idénticos que serán gestados por animales lecheros en los establos, las crías serán terneras de reemplazo, de exportación o animales para beneficio. Esta estrategia es conocida como “market defined offspring”, es decir, producir la cría de la composición genética y sexo deseado por el mercado.

Los recientes avances en las áreas de biología molecular que permiten el mapeo genético, aislamiento de genes, elaboración de marcadores o identificadores de la existencia de determinados genes en el genoma de un animal, así como la transferencia de genes dentro de una misma especie o entre especies (transgenética) le dan una mayor relevancia a las nuevas tecnologías reproductivas basadas en la transferencia de embriones; así, se podrá identificar tempranamente, al momento de hacer la muestra para secado del embrión, si el embrión en cuestión tiene el o los genes en que estamos interesados (por ejemplo genes para la producción de cierto tipo de proteína de la leche para alto rendimiento o calidad de quesos) y poder multiplicarlo al máximo vía clonación para generar los animales productores.

La “construcción” o generación de animales transgénicos es un proceso largo y aún sujeto al azar (la incorporación del gen y su subsiguiente expresión es totalmente al azar), por lo que la producción de un animal transgénico que exprese el gen insertado, en el órgano deseado y en el nivel suficiente, es un animal de altísimo costo y gran valor. La tecnología de **clonación de animales (hacer copias idénticas de animales de cualquier edad post nacimiento) a partir de sus células somáticas** (ver esquema de la tecnología en la gráfica 5), en lugar de la clonación de los embriones, es para este caso de multiplicación de animales, la tecnología más apropiada pues no tenemos que esperar hasta que el animal transgénico nos demuestre que tiene el gen y que lo expresa en el nivel adecuado. La producción de animales por clonación, usando como material genético las células somáticas de un individuo ya existente, ha sido demostrada por los escoceses al producir una copia de un animal adulto (“Dolly”), a partir de células somáticas tomadas de la ubre (Wilmut, I. et al. 1997 a; Wilmut, I. et al. 1997 b). Nosotros en Nueva Zelanda hemos logrado clonar dos vacas adultas (Wells, et al. 1999) a partir de células somáticas de la granulosa ovárica y hemos producido más de 15 terneros nacidos producto de clonación por transferencia nuclear de células somáticas (o sea hemos replicado el milagro de “Dolly”



en el vacuno, clonando las vacas “Lady” y “Elizabet”, “Elsie” y “Lady”; “Elsie” fue el primer clon de “Lady”). La tecnología de clonación con base en células somáticas está en estado de desarrollo con el fin de lograr eficiencias que permitan su utilización comercial. Esta tecnología jugará un papel crucial en la multiplicación de animales transgénicos o en el rescate de razas o especies en extinción. Su rol en mejoramiento genético dentro de sistemas de selección y genética poblacional es, sin embargo, menos importante que el rol de la clonación de embriones, ya que la clonación de embriones permite la utilización de material genético sin incrementar el intervalo generacional (los embriones son los animales del futuro, los animales idénticos generados estarán listos para ser usados para la producción o para la reproducción al mismo tiempo que el animal que hubiera sido generado del embrión original), mientras que la clonación de animales post nacimiento incrementa el intervalo generacional (por ejemplo si clonamos un toro probado de 5 años de edad sus copias no podrán ser utilizadas para la producción de semen sino después de 2 años de obtener la muestra, por lo que las crías que sean producto del semen de estos toros copia no nacerán sino cuando el toro original tenga 8 años).

Como una medida transitoria y a la espera de que los sistemas de clonación de embriones y de animales adultos alcancen niveles comerciales de eficiencia, una manera de reducir el costo de producción de embriones sexados que venimos utilizando es la bisección de los embriones (Vivanco, et al. 1991); estos son sexados y luego de determinar el sexo son partidos (bisectados) en dos mitades simétricas, cada mitad al ser transferida a las recipientes (ya sea las dos mitades en una recipiente o una mitad en cada recipiente) generara un nuevo embrión. En promedio se incrementa en 30% la producción de crías comparando con la cantidad de crías a obtenerse por transferencia de los embriones originales enteros, no partidos.

Otro nuevo sistema de producción en el cual se vienen evaluando las nuevas tecnologías reproductivas es en la **inducción de mellizaje en vacunos**. Como es sabido, en el vacuno los mellizos hembra-macho resultan en la esterilidad de la cría hembra debido a la anastomosis de los vasos sanguíneos placentarios de los dos fetos, lo que permite la circulación de niveles de testosterona del feto macho hacia el feto hembra, bloqueando el desarrollo de los órganos reproductivos femeninos. Este hecho ha determinado que, tanto en forma natural como con intervención del hombre, se haya practicado una selección en contra del mellizaje en vacunos. Sin embargo, la eficiencia de producción por vaca podría ser incrementada sustancialmente si las vacas fueran hábiles para producir 2 crías normales por parto en lugar de una sola. La transferencia de embriones sexados permite la producción de mellizos del mismo sexo, lo cual es de gran valor para los hatos de reproducción, ya que ambas crías serán hembras fértiles. En la producción de ganado de beneficio la producción de machos es de mayor importancia por lo que también la transferencia de dos embriones sexados es beneficiosa; sin embargo, existe también la posibilidad de producir mellizos transfiriendo un embrión sexado a vacas recipientes que hayan sido



inseminadas 7 días antes de la transferencia, en este caso uno de los fetos provendrá de la fertilización del ovocito ovulado por la vaca y el otro feto provendrá del embrión transferido, en este caso el 50% de los mellizos será de pares de sexo diferente. La producción de mellizos vía transferencia embrionaria en vacunos la tenemos aún en evaluación y hay ciertos problemas que resolver (mayor mortalidad embrionaria en gestaciones gemelares que en simples, mayor incidencia de distocias al parto), pero confiamos que seleccionando las recipientes que son capaces de llevar a término exitoso gestaciones gemelares podremos desarrollar líneas de vacas con predisposición para gestaciones múltiples.

El enorme potencial, tanto en mejora genética como en el desarrollo de nuevos sistemas de producción que el conjunto de tecnologías reproductivas nos ofrecen, ameritan que se hagan todos los esfuerzos por incorporarlas dentro de nuestros planes de desarrollo ganadero.

La presente década se ha denominado la década de la biotecnología, por el gran potencial y los grandes avances que se vienen logrando en esta área. Sin lugar a dudas estamos frente a una de las etapas más apasionantes en el desarrollo de técnicas reproductivas. Lo que hagamos o dejemos de hacer ubicará a los países Latinoamericanos como generadores de tecnología y países de avanzada, o como permanentes importadores de tecnología. El reto está dado, es cuestión de trabajar para lograr ser dueños de nuestro propio destino.

## Referencias

- ARLOTTO, T.; BEAUMONT, S.; VIVANCO, H. W. Bovine in vitro fertilisation with low numbers of flow cytometrically sorted sperm. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS ON ANIMAL REPRODUCTION. (13: 1996 : Sydney). Proceedings XIII International Congress on Animal Reproduction. Sydney : [s.n.], 1996. Vol. 3; p. 8-2.
- GREANEY, K. B.; MCDONALD, M. F.; VIVANCO, H. W.; TERVIT, H. R. Out of season embryo transfer in five breeds of imported sheep. *In*: Proceeding New Zealand Society Animal Production. No. 51 (1991); p. 129.
- KINHOM, B. Principles of Genetic Progress. *In*: HAMMOND, K.; GASER, H. B.; MC DONALD, C. A., edit. Animal breeding: The modern approach. Sydney: Post Graduate Foundation in Veterinary Medicine, 1992. p. 103-204.
- LOHUIS, M. M. Potential benefits of bovine embryo manipulation technologies to genetic improvement programs. *In*: Theriogenology. No. 43 (1995); p. 51-60.
- MARTINEZ, D. M. El sector ganadero en el Perú, aspectos económicos y productivos. Lima : Progra-



ma Nacional de Investigación en Ganadería, 1984.

- MCCLINTOCK, A.; NICHOLAS, F. W. The implications of advanced breeding technologies. AMLRDC (Australian Milk Research and Development Council) Report.. 1990.
- NICHOLAS F. W.; SMITH, C. Increased rates of genetic change in dairy cattle by embryo transfer and splitting. *In*: Animal. Production. No. 36 (1983); p. 341-353.
- POLLACK, E. J. Breeding values and accuracy of estimation. *In*: Extension Bulletin, 1988.
- SMEATON, D. C.; VIVANCO, H. W. Potential benefits from new reproductive technologies in commercial dairy herds; a case study simulation. *In*: Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production. Vol. 61 (2001); p. 199-202.
- ———— Potencial benefits from new reproductive technologies in dairy herds; a case study simulation, 2001.
- STEANE, D. E.; SIMM, G.; GUY, D. R. The use of embryo transfer in terminal sire sheep breeding schemes. *In*: WORLD CONGRESS ON SHEEP AND BEEF CATTLE BREEDING (3 : 1988 : Paris). Vol. 2 . Proceedings III World Congress on Sheep and Beef Cattle Breeding. Paris : [s.n.], 1988. p. 211-213.
- VIVANCO, H. W. Alternatives for the Intensive Utilisation of high genetic merit females for livestock improvement purposes. AgResearch. Ruakura Research Centre, dairy and beef division. Internal document. 1997.
- ———— Development and application of Ovum Pick Up (OPU) and In-Vitro embryo production in the bovine. A view to arTech experiences. *In*: AUSTRALIAN EMBRYO TRANSFER SOCIETY PERTH CONFERENCE ET BEYOND 2000 (2000 : Perth). Proceedings of the Australian Embryo Transfer Society Perth Conference Et Beyond 2000. Perth : Australian Embryo Transfer Society, 2000. p. 29-48.
- VIVANCO, H. W. .et. al. Large scale commercial application of bisection of sheep embryos. *In*: Theriogenology. No. 35 (1991); p. 292.
- ———— Production of live normal calves from embryo reconstructs Generated by nuclear transfer of blastomeres from In-Vitro produced embryos. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS ON ANIMAL REPRODUCTION. (14 : 2000 : Stockholm). Proceedings XIV International Congress on Animal Reproduction. Vol. 2, 2000. p. 19-15.
- VIVANCO, H. W.; GREANEY, K. B. Comparison of survival of bisected and whole sheep embryos



transferred in-season and out of season. In: Theriogenology. No. 37 (1992); p. 316.

- WELLS, D. N. et. al. The use of adult somatic cell nuclear transfer to preserve the last surviving cow of the Enderby Island cattle breed. In: Theriogenology. Vol. 51 No. 1 (1999); p. 217.
- WILMUT, I. et. al. Viable offspring derived from fetal and adult mammalian cells. In: Nature. No. 385 (1997); p. 810-813.
- WILMUT, I.; MCWHIR, J.; CAMPBELL, K. Nuclear transfer from cultured cells: a new opportunity in animal breeding?. In: Milk composition, production and biotechnology. (1997a); p.389-396.

