

Capítulo 4

Selección genética de ovinos resistentes a endoparásitos

Jaime Piñeira

Biólogo Marino

Con miras a evaluar la posibilidad de soluciones innovadoras para el control de endoparasitismos ovinos en Magallanes, uno de los objetivos del estudio que da origen a este boletín fue “Estudiar parámetros genéticos de la variable recuento de huevos parasitarios como información base para su aplicación en selección de animales resistentes a endoparasitismo”, en cuyo contexto se realizó una primera aproximación al estudio de la factibilidad de aplicar programas de selección genética para ovinos resistentes a endoparasitismos en Magallanes.

A continuación, se describen algunos aspectos clave de la selección genética animal, y posteriormente se muestran los interesantes resultados de los análisis realizados en el contexto de este estudio.

1. Selección genética animal

La mejora genética es una práctica realizada en muchas partes del mundo, cuyo fin es obtener animales más eficientes en el aprovechamiento de los recursos disponibles² en distintos sistemas de producción.

Para lograr dichas mejoras existen dos grandes estrategias, las cuales fueron descritas por autores como Cuningam (1973): la implementación de sistemas de cruzamientos y la selección direccional. La elección de la estrategia más adecuada dependerá de dos variables claves: la heredabilidad (h^2) del carácter a mejorar, la cual puede ser baja (0 - 0,25), mediana (0,26 - 0,50) o alta (0,51 - 1) y la existencia o no de vigor híbrido o heterosis (Buxadé, 1995).

¹ Pradera, suplementos alimenticios, agua, características edafoclimáticas, recursos humanos, etc.

Implementación de sistemas de cruzamientos: por lo general, la mejora genética logra muy buenos resultados implementando sistemas de cruzamiento cuando las heredabilidades son muy bajas, pero existe vigor híbrido. Esta estrategia permite la generación de híbridos terminales con grandes potencialidades productivas y reproductivas. Sin embargo, las líneas puras en el tiempo se deben mantener, ya que los híbridos terminales no pueden ser multiplicados. Además, esta estrategia puede ser utilizada en la generación de razas sintéticas estables, que sí pueden ser multiplicadas y sometidas a selección direccional. Por ejemplo, la raza ovina Hidango, inscrita por INIA el 24 de enero de 2022 (SAG 2022)².

La selección direccional: es una estrategia susceptible de implementar cuando las heredabilidades van de medias a altas, obteniendo excelentes resultados a mediano plazo y a bajo costo (Buxadé, 1995). Dicha estrategia se basa en escoger a los animales con mayor mérito genético, que van a ser los padres de las próximas generaciones, los que serán apareados de forma más privilegiada que el resto de los reproductores disponibles. Este proceso permite que los animales con mayor mérito genético (mejoradores) dejen más descendientes y contribuyan en mayor medida con el patrimonio genético de la próxima generación, obteniendo más copias de sus genes y alterando la estructura genética de la población. Esto es particularmente importante en las especies donde las hembras de reposición provienen del propio rebaño, siendo el caso de los bovinos de leche y carne, ovinos, caprinos, entre otros (Stermán y Aguirre, 2019).

Para lograr esto, en el proceso de selección de reproductores, el mejorador genético animal busca evaluar y ranquear a los potenciales reproductores (hembras y machos) por su mérito genético y no por su mera apariencia externa o fenotipo (Buxadé, 1995). Así, la intensidad con la que se realiza la selección (IS) juega un rol clave, es decir, el porcentaje de animales que son seleccionados entre un total de potenciales reproductores, la variabilidad genética (VG) existente en el rebaño sometido a selección, la precisión con la que se estima el mérito genético de los animales (ACC) y el intervalo generacional (IG) de la especie con la cual se trabaja, permiten estimar los progresos genéticos (PG) que podrán ser alcanzados con la estrategia de selección implementada de acuerdo a la ecuación N° 1:

$$PG = \frac{(IS+VG+ACC)}{IG} \quad (\text{N}^\circ 1)$$

² Resolución 466 Exenta, Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).

1.2. Métodos utilizados en la selección direccional

Desde principios del siglo XX, los genetistas han desarrollado diversas estrategias que permitan estimar el mérito genético de los animales maximizando la ACC de las estimaciones e intentando mantener la mayor cantidad de VG. Esto debido a que, si ambas variables se mantienen elevadas, los PG serán maximizados y viceversa (Ecuación 1).

En el año 1949 se realizó el primer gran avance, a través de un joven estadístico estadounidense y pionero en la cría de animales llamado Charles Roy Henderson, quien aplicó por primera vez métodos cuantitativos para la evaluación genética del ganado doméstico (Henderson, 1949). Esto fue de vital importancia, ya que permitió a los criadores y genetistas predecir si las crías de un animal tendrán o no un rasgo deseado y en qué medida se expresará dicho rasgo. Además, Henderson desarrolló ecuaciones de modelos mixtos para obtener las mejores predicciones lineales insesgadas (BLUP, Best Linear Unbiased Prediction) de los valores genéticos y, en general, cualquier efecto aleatorio incluido en el modelo. También, él inventó tres métodos para la estimación de los componentes de la varianza en entornos desequilibrados de modelos mixtos, y un método para construir el inverso de la matriz de relación del numerador de Wright basado en una lista simple de información genealógica.

El modelo animal propuesto por Henderson es, actualmente, una de las herramientas más precisas y económicas para la estimación del mérito genético de los potenciales reproductores. Entre sus propiedades destacan sus ventajas en caracteres con baja h^2 que se expresan en un único sexo, cuando las comparaciones se realizan entre animales de distinta edad o ubicados en distintos ambientes. Además, la variación genética se puede modelar matemáticamente de forma que se ajuste lo más posible a la realidad (Gutiérrez, 2010). Esto significa que el modelo utilizado puede ser continuamente mejorado hasta obtener ACC que pueden superar el 95 %. Por su parte, la selección de reproductores en el tiempo no solo se ha centralizado en la selección de animales más eficientes en la producción de materias primas como carne, lana o leche. También, el avance en la selección de animales se ha logrado en aspectos como eficiencia reproductiva (Notter, 2012), temperamento (Piedrafita y Manteca, 2002), respuesta inmune (Wilkie y Mallard, 1999). En relación con este último punto, durante las últimas décadas ha tenido mucha relevancia el estudio de las pérdidas económicas, derivadas de endoparásitos en ganadería, las que se encuentran asociadas con alteraciones en parámetros productivos como es la

ganancia de peso, entre otras, impactando la productividad final. Así, en ovinos se han detectado pérdidas de 0,008 kg de peso vivo por cada unidad incremental de huevo parasitario encontrado en corderos evaluados, equivalente a 16 \$USD de pérdida por animal (Ilangopathy y col., 2019).

A nivel mundial, los aumentos en temperaturas medias de 1 °C y alrededor de 20 % en lluvias y humedad causadas por el cambio climático, han provocado notorios aumentos en la carga endoparasitaria en animales domésticos (Kenyon y col., 2009). Particularmente, en regiones extremas de Chile, como la Región de Magallanes, las simulaciones para los años 2021 y 2040 indican aumentos de temperatura anual promedio de entre 0,5 y 1,5 °C y aumentos de las precipitaciones invernales en de entre 0 y 10 % (Rojas y col 2019).

Los resultados obtenidos a partir de monitoreo en estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) indican aumentos de la temperatura anual promedio entre 0,6 y 0,8 °C en los últimos 8 años (Suarez y col., 2021). Entre las estrategias de control endoparasitario más comunes están los antiparasitarios, cuyo uso indiscriminado ha llevado a la aparición de parásitos resistentes para todas las clases de antihelmínticos (medicamento utilizado en el tratamiento de las helmintiasis, es decir las infestaciones por vermes, helmintos o lombrices), actualmente disponibles en el mercado, transformándose en un problema creciente para la industria ovina y de preocupación para la sanidad humana bajo el concepto "One Health" (FAO, 2020). Para fomentar la adaptación de empresas ovinas regionales a esta situación, es fundamental generar más información para establecer planes de manejo precisos e innovar buscando opciones de solución de largo plazo, como la selección genética de animales más resistentes.

2. Avances a nivel mundial en materia de selección genética de animales resistentes a endoparásitos

Todos los aspectos de los organismos vivos están determinados por su composición genética y cómo ésta interactúa con su entorno. La capacidad de una población para cambiar genéticamente y adaptarse a su entorno depende de la variabilidad genética disponible, la interacción entre los rasgos y la cantidad de presión de selección aplicada. Existe amplia evidencia que muestra que existe variación genética para la resistencia a enfermedades entre razas y dentro de los animales reproductores (Karlsson y Greeff, 2012).

Desde un punto de vista evolutivo, las ovejas probablemente fueron domesticadas entre 8.000 y 10.000 años en áreas como las praderas semiáridas y las áreas montañosas del sureste de Europa. El origen ancestral es ambiguo pero, generalmente, se piensa que el muflón es uno de los antepasados más probables de ovejas domesticadas (Legge, 1996; Meadows y col., 2007) (Figura 1). Las primeras ovejas seguían un comportamiento de pastoreo estacional, lo que les permitía moverse libremente, dependiendo del suministro local de alimentos y las condiciones climáticas. En estas condiciones, las ovejas podrían evitar las regiones previamente pastoreadas, por lo que no necesitarían gastar recursos significativos en el control de parásitos. Esto dificultó que un parásito nematodo individual completara la etapa de vida libre de su ciclo de vida, lo que redujo la probabilidad de su supervivencia. Esto se puede esperar que podría haber resultado en la selección por fecundidad para aumentar las posibilidades de supervivencia de la población de parásitos. Desde el punto de vista del huésped, es posible que hubiera alguna selección a favor de la aversión a los sitios de pastoreo de alto riesgo, como los próximos a los sitios de depósito fecal, ya que las ovejas y el ganado evitan pastar cerca de los sitios de depósito fecal (Karlsson y Greeff, 2012).



Figura 1. Muflón europeo (<https://s1.abcstatics.com/media/deportes/2020/10/05/muflon2-k0iB--1248x698@abc.jpg>).

Del mismo modo, es posible que, en sistemas extensivos de pastoreo, el perfil genético de algunos animales derive en jerarquizaciones poblacionales o en comportamientos selectivos hacia hierbas que tienen efectos antiparasitarios como la *Leucaena* (Scribano, 2013) y algunas achicorias forrajeras (Peña-Espinoza, 2016).

En tiempos recientes, hay evidencia de que la selección natural ha operado en algunas de las poblaciones de ovejas salvajes que se encuentran en islas, como esas de la costa escocesa, donde hay menos posibilidades de evitar los parásitos (Karlsson y Greeff, 2012). Estos, ahora están proporcionando información para el creciente campo de la inmunología ecológica o eco-inmunidad. Este trabajo está desarrollando el concepto de inmunidad óptima, especialmente, donde existen restricciones estacionales sobre los recursos y, por lo tanto, una necesidad de equilibrar su asignación (Martin y Coon, 2010).

3. El efecto de la agricultura intensiva

Los primeros sistemas agrícolas iban desde nómadas hasta sistemas de pastoreo comunal estacional (Karlsson y Greeff, 2012). Durante el siglo XIX, una intensificación gradual de la agricultura hubo en muchas áreas, donde las ovejas estaban confinadas en situaciones de mayor densidad de población. La disponibilidad de fertilizantes y el descubrimiento de minerales traza específicos de plantas y animales, ayudaron a mejorar las deficiencias nutricionales específicas y aumentaron drásticamente los rendimientos. Finalmente, un mayor control del movimiento de ganado a partir de cercas asequibles y efectivas, y cultivos y pastos de mayor rendimiento permitieron una mejor bioseguridad y una gestión eficiente de la masa ganadera. Esto ha resultado en un aumento adicional en las tasas de densidad animal con poblaciones confinadas a áreas más pequeñas. Como resultado de esto, un cambio importante en el microambiente local se ha generado con una mayor densidad de pastos a nivel del suelo y animales pastando más cerca del suelo. Todos estos factores favorecen las etapas de vida libre de los parásitos tanto en términos de supervivencia como de facilitar la ingestión por parte del huésped (Figura 2). Así, los ovinos como especie se han visto enfrentados a situaciones mucho más desafiantes debido a los parásitos. Pero como estos cambios se han producido en un período corto de tiempo, es difícil para la selección natural hacer que los anfitriones puedan adaptarse tan rápidamente a este cambio (Martin y Coon, 2010).

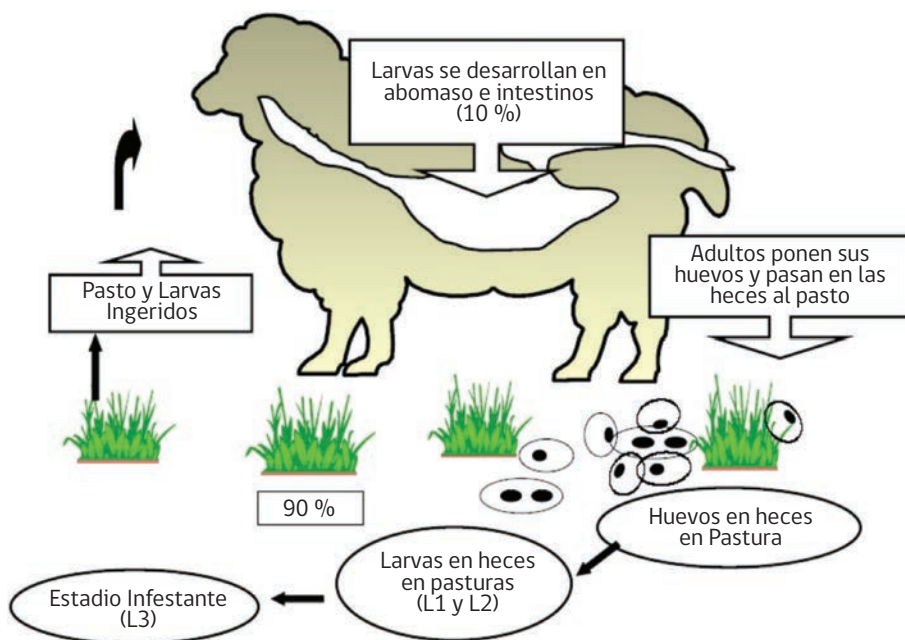


Figura 2: Esquema del ciclo de vida de los nemátodos en ovinos (adaptado de Barreda 2016).

4. Manejo convencional de los parásitos en sistemas de producción animal

Después de la Segunda Guerra Mundial, se produjo un rápido crecimiento en la industria química y, consecuentemente, de los productos utilizados en la agricultura (Karlsson y Greeff, 2012).

En 1961, el primer antihelmíntico de amplio espectro tiabendazol fue lanzado en Australia (Dunsmore, 1962). Los productos químicos antihelmínticos han tenido un gran impacto en la producción animal y han contribuido a aumentar la densidad de población. La eficacia de estos productos ha hecho que los productores dependan más de estos productos químicos, lo que permite que los animales, genéticamente susceptibles a los parásitos, sobrevivan y puedan ser utilizados en producción. Igualmente, el uso intensivo de parasiticidas efectivos ha resultado en una presión de selección muy alta a favor de genotipos resistentes en las poblaciones de helmintos. Esto ha gatillado un rápido desarrollo de la resistencia a los agentes de

control químico de uso común. En general, ahora existe una mayor aceptación en que el control de parásitos sostenible a largo plazo debe basarse en un enfoque de “Manejo integrado de parásitos» (Karlsson y Greeff, 2005). Los componentes de este enfoque son los siguientes:

- Resistencia mejorada del huésped (genética; no genética: nutrición, estrés reducido; respuesta inmune mejorada y/o específica).
 - Desafío reducido/controlado (gestión de pastoreo, rotación estratégica de ganado).
- Control biológico.
- Programas de seguimiento como base para la gestión estratégica y proactiva.

El énfasis relativo en los diferentes componentes del “Manejo Integrado de Parásitos” varía según los diferentes sistemas huésped-parásito. A modo de ejemplo, el control de piojos en la industria de la oveja merino australiana no se basa en ningún componente genético, sino que en la prevención de miasis. Sin embargo, paulatinamente se ha incrementado el aprovechamiento de las diferencias genéticas existentes entre razas y entre animales para establecer poblaciones más resistentes (Karlsson y Greeff, 2012).

5. Mecanismos de defensa del huésped

En los mamíferos, los mecanismos de defensa cubren funciones de barrera de las respuestas inmunitarias epiteliales, innatas y adoptivas. Además, el sistema inmunitario puede considerarse como un sistema paralelo al sistema endocrino en su capacidad para provocar respuestas inmunitarias específicas y controlar las funciones metabólicas y la partición (Sykes y Greer, 2003). Esto sugiere una genética muy compleja, ya que, en humanos, se ha estimado que hay más de 1.500 genes involucrados en la defensa inmunológica (Kelley y col., 2005). El contexto completo de esto está fuera del alcance de este capítulo, pero reconocemos que esto podría explicar algunos de los resultados aparentemente contradictorios observados en distintos ensayos (Ward y col., 1993).

Los parásitos comunes van desde formas simples, como los coccidios, hasta formas complejas, como los nemátodos. Esto provoca una respuesta inmune diversa e igualmente compleja del huésped. Este aspecto debe monitorearse para detectar cualquier respuesta desfavorable en la selección genética para aumentar la resistencia del huésped (Karlsson y Greeff, 2012).

6. Mejoramiento para la resistencia al parasitismo por nemátodos gastrointestinales en ovinos

En general, los recuentos de huevos fecales se utilizan como rasgo indicador de la resistencia a los helmintos (Gasbarre y Miller, 2000). Éste es un rasgo heredable y la mayoría de las estimaciones de h^2 se basan en un recuento de huevos fecales que oscila entre 25 y 30 %. Sin embargo, el rasgo es muy variable y la precisión de la selección aumenta significativamente con dos conteos por animal individual. La h^2 de los recuentos de huevos fecales, en el estado de destete de los corderos, tiende a ser ligeramente inferior o cercano al 20 %, comparado con las estimaciones de animales adultos (Pollott y col., 2004).

En Australia Occidental, durante periodos de lluvias invernales, se ha descubierto que la estimación de h^2 de los recuentos mensuales de huevos fecales puede variar de 0 a 55 %. Las estimaciones de h^2 en ovejas, para los meses de verano, fueron muy bajas comparado a las que recibían alimento verde y estaban expuestas a las larvas en los meses de invierno y primavera (Karlsson y col., 1991, 1995; Greeff y col., 1995).

Por otro lado, la inmunocompetencia total en poblaciones no seleccionadas, generalmente, se alcanza a la edad de 7 a 9 meses. Mientras que en poblaciones seleccionadas, las diferencias genéticas se detectan cuando los individuos tienen entre 3 y 4 meses de edad (Karlsson y Greeff, 2006). Así, la expresión temprana de la resistencia del parásito es clave, ya que el primer año suele ser el más difícil en el ciclo de vida del individuo. Cuando esto se combina con una reducción del aumento periparto en la oveja, esto puede tener un impacto favorable en toda la epidemiología del rebaño (Greeff y Karlsson, 2006; Williams y col., 2010). Lo anterior guarda relación con lo observado en países como Australia y Nueva Zelanda, donde se han logrado buenas respuestas a la selección contra las principales especies de parásitos mediante selecciones de animales con bajos recuentos de huevos fecales (Albers y col., 1987; Woolaston y Piper, 1996; Greeff y Karlsson, 1998; Karlsson y Greeff, 2006; Morris, 2009).

La selección general para resistencia a parásitos basada en un bajo recuento de huevos en heces en la población merina australiana no ha resultado en ninguna respuesta correlacionada negativamente con los rasgos de producción de importancia económica. Sin embargo, Bisset y Morris (1996) observaron que las

líneas de ovejas destinadas a la producción de carne o de doble propósito, que habían sido seleccionadas para la producción, tenían un nivel más bajo de resistencia a los parásitos. Esto pudo deberse a que en dicho ambiente el desafío del parásito³ estaba controlado por antihelmínticos efectivos. Sin embargo, en una evaluación de seis rebaños de merino australianos, las correlaciones genéticas agrupadas entre el conteo de huevos fecales y el peso del vellón grasoso fue de 0,15, entre el conteo de huevos fecales y el diámetro de la fibra -0,06 y entre el conteo de huevos fecales y el peso corporal -0,21 (Eady y col., 1998). Estas estimaciones pueden variar para diferentes genotipos y ambientes (Knap y Bishop, 2000).

En la raza ovina "Merino Rylington" se realizó selección genética durante casi 25 años para alcanzar un bajo recuento de huevos en heces (Karlsson y col., 2006), donde la única relación desfavorable fue una incidencia, ligeramente mayor, de diarrea en la línea de selección (Karlsson y col., 2004). También, Cloete et al. (2007) observaron resultados similares en la misma raza, pero en Sudáfrica (Karlsson y Greeff, 2012).

Aunque la relación entre el recuento de huevos y la diarrea es un efecto que no se ha analizado por completo y actualmente se les considera rasgos independientes (Karlsson y col., 2005), se espera observar una disminución de la diarrea con recuentos fecales elevados de huevos y un aumento de la diarrea con recuentos fecales bajos de huevos (Karlsson y Greeff, 2012).

7. Importancia de la selección genética de ovinos para la resistencia a enfermedades parasitaria

La mejora genética para la resistencia a las enfermedades presenta beneficios importantes a los sistemas de producción ovina sostenibles a largo plazo. Además, este enfoque se espera que entregue importantes ventajas de marketing a través de alternativas "limpias y ecológicas", es decir, un tipo de demanda que se espera que aumente en el futuro a partir de las preferencias relacionadas con los consumidores, así como también, los problemas ambientales relacionados con el procesamiento de la lana (Karlsson y Greeff, 2012).

³ Concepto referido al desafío que a menudo tienen los patógenos o parásitos de cambiar de huésped para su sobrevivencia en el tiempo.

Los programas de mejoramiento genético experimentales realizados en Australia y Nueva Zelanda han generado una contribución significativa en la resistencia a enfermedades. Esto ha dado como resultado el establecimiento de recursos genéticos únicos, como Merino Rylington, que ahora es el rebaño de Merino más resistente a los helmintos en Australia (www.sheepgenetics.org.au), y se ha convertido en el principal recurso para estudios genéticos sobre los mecanismos fisiológicos de la resistencia de parásitos (Liu y col., 2005a, b, c; Williams y col., 2008). También, en Nueva Zelanda, se han creado rebaños de ovejas que son un valioso recurso para estudios sobre selección para resistencia y resiliencia (Bisset y col., 2001a).

En la mayoría de las líneas de investigación, la respuesta de selección para la resistencia del parásito se ha comparado con un grupo control no seleccionado (Karlsson y col., 2006), pero en aspectos de manejo se les considera un solo grupo (Karlsson y Greeff, 2012).

Por lo tanto, un efecto de arrastre existe por el grupo control que no es sometido a selección, ya que agrega una presión adicional al grupo sometido a selección. Esto no sucedería en escenarios de selección basados en rebaños, donde se generaría una creciente resistencia a los parásitos nemátodos. Así, el modelo de epidemiología de acuerdo a Bishop y Stear (2003) demostró un beneficio más rápido en la reducción del desafío del parásito y el aumento de la producción de lo que se hubiera predicho solo a partir de la genética cuantitativa. Esto se debe a los beneficios de 'todo el sistema de producción' de la reducción del desafío larvario a los corderos de animales resistentes. También, este tipo de resultados fue descrito por Greeff y Karlsson (2006).

Por el momento, los parámetros genéticos de resistencia a enfermedades parasitarias y las respuestas correlacionadas con rasgos de interés productivo se limitan a información preliminar entre variaciones al interior de algunas razas ovinas y algunas estimaciones de h^2 genética básica preliminar. Por tal motivo, se requiere de más información, como las varianzas genéticas, el efecto de la edad y los factores estacionales en los parámetros genéticos, los cuales permitirían desarrollar programas de mejoramiento genético óptimos (Karlsson y Greeff, 2001; Smith y col., 2009).

Además, existe la necesidad de incluir los beneficios económicos de estos rasgos asociados a resistencia a parásitos, a fin de incluirlos en un índice de selección

para mejorar la sustentabilidad de todo el criadero. También, existe la necesidad de reevaluar regularmente la estrategia de selección óptima para cada una de las condiciones locales, a nivel regional y predial (Liu y Karlsson, 2004).

En la actualidad, se encuentran disponibles poderosas herramientas genéticas que hacen posible lograr una ganancia genética rápida. Sin embargo, esto hace que sea imperativo que se consideren todas las posibles consecuencias. Así, por ejemplo, en algunos de los criaderos más avanzados a nivel mundial, donde se ha realizado un largo período de selección, considerando la inclusión estrecha de rasgos productivos, ahora esto se ha generado a través de una respuesta correlacionada de forma inversa con los rasgos de "aptitud" (Rauw, 2009).

Según lo sugerido por Colditz (2009) en el futuro, en lugar de apuntar a la máxima respuesta de selección para los rasgos productivos importantes, se debería apuntar a una respuesta óptima. Del mismo modo se debe hacer un esfuerzo por resguardar aquellas razas que han sido capaces de adaptarse a determinados ambientes. Al respecto, se han cometido numerosos errores en los últimos 50 años. Un ejemplo de esto, es cuando organizaciones de ayuda bien intencionadas, han llevado razas de alta producción de ambientes templados a ambientes tropicales, para los cuales no son aptas (Greeff y col., 2009).

Por tal motivo, cuando se disponga de varias razas adaptadas a ambientes locales, se debiera evaluar estas razas en condiciones ambientales similares, a fin de identificar las de mejor desempeño en cuanto a la resistencia a endoparásitos. También, las razas adaptadas localmente pueden ser deseables de incorporar para hacerlas genéticamente más resistentes o cruzar algunas de estas razas para desarrollar una única cepa resistente (Karlsson y Greeff, 2012).

Del mismo modo, se han descrito buenos resultados en cruces de razas susceptibles a parásitos con razas adaptadas localmente con mayor resistencia, lo que podría transformarse en una opción más conveniente para las razas de carne (Scobie y col., 2007; 2008). En cambio, en razas ovinas especializadas en la producción de lana blanca, el cruzamiento no suele ser una opción si las razas resistentes son de color o de pelo. Afortunadamente, el gran acervo genético de Merino proporciona suficiente variación dentro de la raza para la resistencia a los parásitos que se podría utilizar en programas de mejoramiento genético (Karlsson y Greeff, 2012).

Los datos sobre valores mejorantes para la resistencia a los nemátodos basados en el conteo de huevos fecales en Australia están disponibles en "Sheep Genetics" (www.sheepgenetics.org.au) y en Nueva Zelanda en "Sheep Improvement Limited" (www.sil.co.nz). Esto es muy relevante, debido a que permite a los criadores de carneros producir crías para aumentar la resistencia a los parásitos y potencialmente minimizar la miasis. Esta tecnología ha resultado en cambios genéticos significativos en criaderos industriales en Australia (Brown y col., 2010) y Nueva Zelanda (Amer, 2009).

Por su parte, la aplicación de marcadores moleculares se ha reconocido desde hace más de 30 años, donde pruebas de ADN pueden ser muy útiles para mejorar rasgos como la resistencia a especies de parásitos difíciles y/o costosos de medir como *Trichostrongylus colubriformis* (Wetherall y col., 1991). La investigación hasta la fecha ha demostrado que es poco probable que existan genes mayores⁴, ya que los rasgos de resistencia están más influenciados por muchos genes con efectos pequeños pero aditivos (Kemper, 2010).

Sin embargo, el Consorcio Internacional de Genómica Ovina (www.sheephapmap.org) está llevando a cabo programas de investigación que se centran en la identificación de marcadores de polimorfismos de un solo nucleótido para la resistencia a enfermedades. Esta información de ADN se utiliza para predecir un valor de mejoramiento genómico y ofrece oportunidades para obtener ganancias genéticas más rápidas para los rasgos de resistencia a enfermedades (McEwan, 2009; Zarlenga y Gasbarre, 2010; Tier, 2010). Así, avances significativos se han logrado en estas áreas como el desarrollo de una matriz 1.5k con la que se espera, independiente de los debates éticos, contribuir en gran medida a identificar animales genéticamente resistentes. Dependiendo del punto de vista ambiental esto puede proporcionar opciones de control de parásitos "limpias y ecológicas" (Laible, 2009).

⁴ Genes que causan grandes diferencias en los rasgos de organismos que heredan diferentes alelos.

8. ¿Cómo instalar un plan de selección para animales resistentes a endoparasitismos?

Existe la idea general de que el mejoramiento para la resistencia a las enfermedades, aunque es un objetivo loable, va a ser muy lento, por este motivo, no se promueve como una alta prioridad (Karlsson y Greeff, 2012).

Por lo tanto, el desafío para Chile es demostrar los beneficios acumulativos de la selección genética y su papel lógico en los programas de control de gestión sostenible de parásitos.

Para lograr este propósito existe la necesidad de contar con apoyo del gobierno y/o de la industria. Esto puede variar desde el apoyo financiero de proyectos de investigación hasta la implementación de núcleos genéticos experimentales. Tener líneas de selección genética a una escala razonablemente grande es el mejor modelo para dilucidar los mecanismos genéticos subyacentes y demostrar la viabilidad de un enfoque de reproducción y el valor de los animales genéticamente resistentes (Karlsson y Greeff, 2012).

Las líneas de selección son herramientas poderosas en el proceso de adopción, ya que demuestran el éxito mediante el uso de tecnologías de mejoramiento. Tales líneas son recursos valiosos y pueden convertirse en una importante fuente de material genético para los rebaños productivos a nivel nacional. Las experiencias observadas en países como Australia y Nueva Zelandia han demostrado que estas líneas también alientan a los criadores locales a medir y registrar sus animales en busca de rasgos asociados a enfermedades (Albers y col., 1987; Woolaston y Piper, 1996; Greeff y Karlsson, 1998; Karlsson y Greeff, 2006; Morris, 2009). Al generar vínculos genéticos entre rebaños (conexiones genéticas), les permitirá identificar animales genéticamente superiores en otros criaderos para aumentar su tasa de ganancia genética para rasgos de producción y enfermedades (Piñeira y col., 2018).

Dada la complejidad de la gestión integrada, es muy deseable que se siga un enfoque multidisciplinario. Está claro que la genética cobrará mayor importancia en el futuro, para explicar las diferencias entre animales y el efecto que tienen los animales resistentes en la epidemiología de los parásitos. Esto debería tener un efecto dramático en la salud animal, lo que se reflejaría en una mayor rentabilidad y sostenibilidad de los sistemas de producción animal (Karlsson y Greeff, 2012).

Un programa de mejora para la selección de reproductores resistentes a endoparásitos debería comenzar con análisis coprológicos a edades estandarizadas sobre toda la masa de borregas y carnerillos de cada año. El dato del recuento de la carga parasitaria debe ser anotado junto al registro genealógico del rebaño y dicho registro debe ser analizado mediante la metodología BLUP (Figura 3).

Una vez obtenidas las pruebas de progenie, estas permitirían generar un ranking con los animales que en igualdad de condiciones su sistema inmunológico fue capaz de controlar de mejor manera la carga de parásitos.

Dichos animales deben ser utilizados como reproductores (machos y hembras), lo que permitirá traspasar dicha "resistencia" a su descendencia. De esta manera, al cabo de unas cuantas generaciones se podrá contar con rebaños cada vez más resistentes y líneas de reproductores que podrían ser explotados comercialmente (Figura 3).

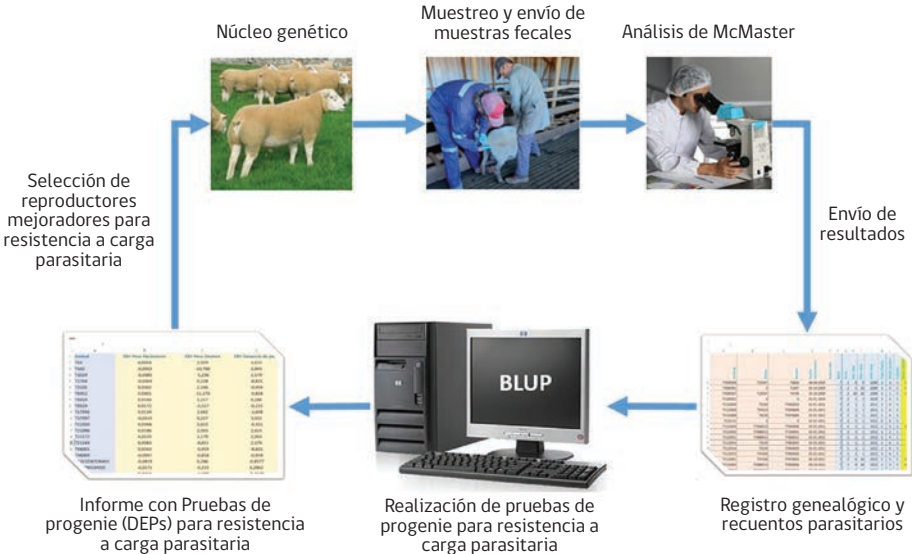


Figura 3. Etapas de un programa de mejoramiento genético para la resistencia a endoparásitos mediante selección direccional.

9. Resultados preliminares para Magallanes

Estudios realizados durante el año 2022 por el Centro Regional de Investigación INIA Kampenaike, en la región de Magallanes, permitieron realizar una primera estimación de la h^2 de la resistencia a la carga parasitaria en crías de ovinos de las razas Suffolk Down, Texel, Corriedale y Dorset. De esta manera, si h^2 presenta valores medios (0,26-0,50) o altos (0,5- 1,0) sería posible seleccionar animales más resistentes (Buxadé, 1995) y, por lo tanto, menos susceptibles de padecer endoparasitosis. La carga parasitaria se cuantificó en los corderos nacidos durante el año 2021, utilizando el protocolo McMaster. Dicho análisis permitió determinar la cantidad de nematodirus (NEM, Figura 4) y huevos tipo estrongilideos (HTS, Figura 5) de cada animal a los 3 y a los 6 meses de edad. La estimación de la h^2 se llevó a cabo mediante el análisis de hermanos y medios hermanos según la metodología descrita por Searle (1971), por lo que resultó de vital importancia contar con el registro genealógico de los rebaños.



Figura 4. Nemátodo del género *Trichostrongylus*, muy común en ovinos (<https://www.rvc.ac.uk/review/parasitology/ruminant13/Trichostrongylus.htm>).



Figura5. Huevostipostrongilideos (HTS) (https://www.researchgate.net/publication/277236192_Estrongilidose_em_exploracoes_equinas_com_vocacao_tauromaquica/figures?lo=1).

Aunque el análisis fue de carácter preliminar debido a que es necesario aumentar el número de animales evaluados y realizar correcciones a la metodología de conteo de NEM y HTS, el resultado indica que las heredabilidades son en promedio altas (>0.5, Cuadro 1).

Cuadro 1. Número de padres, madres e hijos obtenidos por grupo de razas ovinas. También se presenta la h^2 estimada para el recuento de nematodirus (NEM) y huevos tipo strongilideos (HTS) a los 3 meses (h^2 Nem3, h^2 HTS3) y a los 6 meses (h^2 Nem6, h^2 HTS6).

Raza ovina	Nº Padres	Nº Madres	Nº Hijos	h^2 Nem3	h^2 HTS3	h^2 Nem6	h^2 HTS6
Suffolk Down	3	40	50	0,96	s/r	s/r	0,74
Texel	4	45	48	s/r	s/r	s/r	0,32
Corriedale	5	61	63	s/r	s/r	0,67	s/r
Dorset	6	59	62	0,32	s/r	0,51	0,99
Total	18	205	223	s/r	s/r	s/r	s/r
Promedio h^2				0,64	s/r	0,59	0,69
s/r: Sin Resultado							

Referencias

- Albers, G.A.A., Gray, G.D., Piper, L.R., Barker, J.S.F., Le Jambre, L.F., Barger, I.A., 1987. The genetics of resistance and resilience to *Haemonchus contortus* infection in young Merino sheep. *Int. J. Parasitol.* 17, 1355-1363.
- Amer, P.R., 2009. Rates of genetic progress begin achieved throughout the New Zealand ram breeding industry. *Proc. N. Z. Soc. Anim. Prod.* 69,155-157.
- Barreda R. 2016. Evolución de la infección natural de nematodos gastrointestinales en una generación de borregos durante un año. Tesis de Grado para optar al título de Doctor en Ciencias Veterinarias, Universidad la Republica - Uruguay. Disponible en: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/10325/1/FV-32055.pdf>
- Bisset, S.A., Morris, C.A., 1996. Feasibility and implications of breeding sheep for resilience to nematode challenge. *Int. J. Parasitol.* 26, 857-868.
- Bishop, S.C., Stear, M.J., 2003. Modelling of host genetics and resistance to infectious diseases: understanding and controlling nematode infections. *Vet. Parasitol.* 115, 147-166.
- Bisset, S.A., Morris, C.A., McEwan, J.C., Vlassoff, A., 2001a. Breeding sheep in New Zealand that are less reliant on anthelmintics to maintain health and productivity. *N. Z. Vet. J.* 49 (6), 236-246.
- Brown, D.J., Swan, A.A., Gill, J.S., 2010. Within- and across-flock genetic relationships for breech flystrike resistance indicator traits. *Anim. Prod. Sci.* 50, 1060-1068.
- Buxade C. 1995. Zootecnia, Bases de producción animal Tomo IV. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid-España, Pp 111-114.
- Cloete, S.W.P., Olivier, J.J., du Toit, E., Dreyer, F.H., 2007. Genetic analyses of faecal worm egg count in South African Merinos under natural challenge. *S. Afr. J. Anim. Sci.* 37 (4), 237-247.
- Colditz, I.G., 2009. In: Rauw, W.M. (Ed.), Allocation of Resources to Immune Response. CABI, pp. 192-209.
- Cunningham E.P. 1973. Cost effectiveness and population structure in cattle breeding programs. *Ann Génét. Sél. Anim.* 5: 239-256.

- Dunsmore, J.D., 1962. Anthelmintic activity of Thiabendazole against mature and immature *Ostertagia* spp. in sheep. *Aust. Vet. J.* 38, 412-413.
- Eady, S.J., Woolaston, R.R., Lewer, R.P., Raadsma, H.W., Swan, A.A., Ponzoni, R.W., 1998. Resistance to nematode parasites in Merino sheep: correlation with production traits. *Aust. J. Agric. Res.* 49, 1201-1211.
- FAO. 2020. One Health legislation: Contributing to pandemic prevention through law. Disponible en: <https://www.fao.org/3/ca9729en/CA9729EN.pdf>
- FAO. 2014. Adaptación del sector silvoagropecuario a la variabilidad y el cambio climático en la Región de Magallanes y de la Antártica chilena. Disponible en: <https://www.fao.org/3/bc321s/bc321s.pdf>
- Gasbarre, L.C., Miller, J.E., 2000. Genetics of helminth resistance. In: Axford, R.F.E., Bishop, S.C., Nicholas, F.W., Owen, J.B. (Eds.), *Breeding for Disease Resistance in Farm Animals.* , 2nd ed. CAB Int. Publ, New York, pp. 129-152.
- Gutiérrez J.P. 2010. Iniciación a la valoración genética animal. Metodología adaptada a EEES. Editorial Complutense. ISBN 978-84-9938-021-6. Madrid, España. 355pp.
- Greeff, J.C., Karlsson, L.J.E., Harris, J.F., 1995. Heritability of faecal worm egg count at different times of the year in a Mediterranean environment. *Proc. Aust. Assoc. Anim. Breed. Genet.* 11, 117L 121.
- Greeff, J.C., Karlsson, L.J.E., 1998. Incorporating breeding for staple strength and resistance to internal parasites in Merino breeding programs. *Wool Technol. Sheep Breed.* 46, 223.
- Greeff, J.C., Karlsson, L.J.E., 2006. Economic benefit of breeding for worm resistance. In: 8th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Held in Belo Horizonte, Brazil from 14-18 August 2006.
- Greeff, J.C., Karlsson, L.J.E., Schlink, A.C., 2009. Actual standing and perspectives for the sustainable use and development of parasite resistant or tolerant breeds in developed regions: Australia and New Zealand as an example. In: Joint FAO/INRA Workshop on Animal Genetic Resources and Their Resistance/Tolerance to Diseases, with Special Focus on Parasitic Diseases in Ruminants Held from 22-23 June 2009 in Jouy-en-Josas, France.

- Henderson C.R. 1949. Estimates of changes in herd environment. *J. Dairy Sci.* (Abstr) 32: 706.
- Ilangopathy, M., Palavesam, A., Amaresan, S., & Muthusamy, R. 2019. Economic Impact of Gastrointestinal Nematodes in Sheep on Meat Production. *International Journal of Livestock Research*, 9(10), 44-48. doi: 10.5455/ijlr.20190331051814
- Kemper, K.E., 2010. The implications for the host-parasite relationship when sheep are bred for enhanced resistance to gastrointestinal nematodes. PhD Thesis, University of Melbourne.
- Karlsson, L.J.E., MacLeod, I.M., LeeLawardana, D.H., Sissoev, K., Simmons, J., 1991. Selection for nematode resistance in sheep in the Australian Mediterranean climatic zone. In: Gray, G.D., Woolaston, R.R. (Eds.), *Breeding for Disease Resistance in Sheep*. Australian Wool Corporation, Melbourne, pp. 131-138.
- Karlsson, L.J.E., Greeff, J.C., 2001. Response to selection for resistance to sheep nematodes. In: *Vth Int. Sheep Vet. Congr. Held 21-25 January 2001 at Stellenbosch University, South Africa*, pp. 170-171.
- Karlsson L.J.E Y, Greeff J.C. 2012. Genetic aspects of sheep parasitic diseases. *Veterinary Parasitology* 189: 104- 112.
- Karlsson, L.J.E., Greeff, J.C., 2006. Selection responses in faecal worm egg counts in the Rylington Merino parasite resistant flock. *Aust. J. Exp. Agric.* 46, 1-3.
- Karlsson, L.J.E., Greeff, J.C., Thomson, B., Underwood, N., 2006b. Breeding to avoid Flystrike. In: *Aust. Sheep Vet. Ass. Conf. Held at Wagg Wagga, NSW, vol. 16*, pp. 97-102.
- Karlsson, L.J.E., Greeff, J.C., 2005. Sustainable internal parasite control in Australian merino sheep. In: *56th Annual EAAP Meeting, Uppsala, Sweden*, p. 377.
- Kelley, J., Bono, B., Trowsdale, J., 2005. IRIS: a database surveying known human immune system genes. *Genomics* 85, 503-511.

- Kenyon F, Greer AW, Coles GC, Cringoli G, Papadopoulos E, Cabaret J, Berrag B, Varady M, Van Wyk JA, Thomas E, Vercruyse J, Jackson F. 2009. The role of targeted selective treatments in the development of refugia-based approaches to the control of gastrointestinal nematodes of small ruminants. *Vet Parasitol.* 16; 164(1):3-11.
- Knap, P.W., Bishop, S.C., 2000. Relationship between genetic change and infectious diseases in domestic livestock. *Br. Soc. Anim. Sci.* 27, 65-80.
- Laible, G., 2009. Enhancing livestock through genetic engineering - recent advances and future prospects. *Comp. Immunol. Microb. Infect. Dis.* 32, 123-137.
- Liu, S.M., Karlsson, L.J.E., 2004. Nematode parasitism in sheep production. *Ann. Arid Zone* 43, 1-18.
- Liu, S.M., Smith, T.L., Karlsson, L.J.E., Palmer, D.G., Besier, R.B., 2005a. The cost for protein and energy requirements by nematode infection and resistance in Merino sheep. *Livest. Prod. Sci.* 97, 131-139.
- Liu, S.M., Smith, T.L., Palmer, D.G., Karlsson, L.J.E., Besier, R.B., Greeff, J.C., 2005b. Biochemical differences in Merino sheep selected for resistance against gastrointestinal nematodes and genetic and nutritional effects on faecal worm egg output. *Anim. Sci.* 81, 149-157.
- Liu, S.M., Smith, T.L., Briegel, J., Murray, A., Masters, D.G., Karlsson, L.J.E., Palmer, D.G., Greeff, J.C., Besier, R.B., Gao, S.B., 2005c. Comparing productive performance of nematode resistant Merino sheep with non-selected control. *Livest. Prod. Sci.* 97, 117-129.
- Legge, T., 1996. The beginning of caprine domestication. In: Harris, D.R. (Ed.), *The Origins and Spread of Agriculture and Pastoralism in Eurasia*. Smithsonian Institution Press, New York, pp. 238-262.
- McEwan, J.C., 2009. Current and future impact of DNA technologies on the New Zealand sheep industry. *Proc. N. Z. Soc. Anim. Prod.* 69, 157-160.
- Martin, L.B., Coon, A.C., 2010. Infection protection and natural selection. *Science* 330, 602-603.
- Meadows, J.R.S., Cemal, I., Karaca, O., Gootwine, E., Kijas, J.W., 2007. Five ovine mitochondrial lineages identified from sheep breeds of the near east. *Genetics* 175, 1371-1379.

- Morris, C.A., 2009. Review of genetic parameters for disease resistance in sheep in New Zealand and Australia. *Proc. Assoc. Adv. Anim. Breed. Genet.* 18, 263–271.
- Notter D.R. 2012. Genetic improvement of reproductive efficiency of sheep and goats.
- Peña-Espinoza M., Thamsborg S.M., Desrues O. Hansen T.V.A., Enemark H.L. 2016. Anthelmintic effects of forage chicory (*Cichorium intybus*) against gastrointestinal nematode parasites in experimentally infected cattle. *Parasitology* 143(10):1279–93.
- Piedrafita J., Xavier Manteca X. 2002. Mejora genética del comportamiento y del bienestar del ganado rumiante. *!TEA, Vol. 98A N.0 2*, 195–215.
- Piñeira J. Hepp Ch., Sales F., Morales R., Espinoza E., Tapia M., Gebauer F. Una primera aproximación a la conformación de núcleos genéticos dispersos en Chile. Libro de resúmenes XLIII Congreso Anual de la Sociedad Chilena de Producción Animal. Valdivia, Chile.
- Pollott, G.E., Karlsson, L.J.E., Eady, S., Greeff, J.C., 2004. Genetic parameters for indicators of host resistance to parasites from weaning to hogget age in Merino sheep. *J. Anim. Sci.* 82, 2852–2864.
- Rauw, W.M., 2009. Resource allocation theory. In: Rauw, W.M. (Ed.), *Applied to Farm Animal Production*. CABI, pp. 1–21.
- Rojas M., P. Aldunce, L. Farías, H. González, P. Marquet, J. C. Muñoz, R. Palma-Behnke, A. Stehr y S. Vicuña (editores) (2019). *Evidencia científica y cambio climático en Chile: Resumen para tomadores de decisiones*. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- Scobie, D.R., O'Connell, D.O., Morris, C.A., Hickey, S.M., 2007. A preliminary genetic analysis of breech and tail traits with the aim of improving the welfare of sheep. *Aust. J. Agric. Res.* 58, 161–167.
- Scobie, D.R., O'Connell, D., Morris, C.A., Hickey, S.M., 2008. Dag score is negatively correlated with breech bareness of sheep. *Aust. J. Exp. Agric.* 48, 999–1003.
- Scribano V. 2013. Una forrajera que es antiparasitario natural. *Todoagro* N° 436. Disponible en: https://www.produccion-animal.com.ar/sanidad_intoxicaciones_metabolicos/parasitarias/parasitarias_bovinos/178-antiparasitario_natural.pdf

- Smith, D.H., Safari, E., Brien, F.D., Jaensch, K.S., Grimsom, R.J., 2009. The relationship between crutch cover and production and easy care traits in Merino sheep. *Proc. Assoc. Adv. Anim. Breed. Genet.* 18, 338-341.
- Sykes, A.R., Greer, A.W., 2003. Effects of parasitism on the nutrient economy of sheep: an overview. *Aust. J. Exp. Agric.* 43, 1393-1398.
- Sterman J. Aguirre E. 2019. Impacto de la Selección Genómica en el Mejoramiento Productivo del Ganado Bovino de Leche y Carne. BM Editores. Disponible en: <https://bmeditores.mx/ganaderia/impacto-de-la-seleccion-genomica-en-el-mejoramiento-productivo-del-ganado-bovino-de-leche-y-carne-2382/>
- Suarez A., Lira R., Ivelic J., Mc Leood C., Martinez C., Salvo J., Cristobal C., Fuentes M., Ruiz R. 2021. Boletín INIA Nacional de Análisis de Riesgos Agroclimáticos para las Principales Especies Frutales y Cultivos y la Ganadería. Disponible en: <http://riesgoclimatico.inia.cl/public/boletines/>