



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

Programa de Doctorado en Biogeociencias

“Diversificación de cultivos forrajeros para la alimentación del vacuno lechero en la Cornisa Cantábrica”

Forage crops diversification for feeding dairy cows in the Cantabrian Coast

Tesis Doctoral

Silvia Baizán González

Oviedo, 2019



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: Diversificación de cultivos forrajeros para la alimentación del vacuno lechero en la Cornisa Cantábrica	Inglés: Forage crops diversification for feeding dairy cows in the Cantabrian Coast

2.- Autor	
Nombre: Silvia Baizán González	DNI/Pasaporte/NIE:
Programa de Doctorado: Biogeociencias	
Órgano responsable: Centro Internacional de Postgrado	

RESUMEN (en español)

El sector lácteo se enfrenta al desafío de aumentar su producción ante la creciente demanda de alimentos, al tiempo que debe ser más eficiente en el uso de recursos naturales, sustituyendo las prácticas agrícolas habituales por otras más sostenibles. Los sistemas de alimentación basados en forrajes son económicamente más competitivos que los basados en concentrados. Por tanto, para mejorar su rentabilidad, a la vez que se cumplen los requisitos ambientales, las actuaciones deben orientarse a modificar el manejo convencional de cultivo de raigrás italiano por especies igual de productivas pero más sostenibles. Estas nuevas alternativas forrajeras deberán integrarse en la alimentación del vacuno para obtener una buena calidad de la leche. En base a estas premisas, y con el objetivo de ampliar la frontera agrícola introduciendo nuevos cultivos forrajeros de invierno para rotar con maíz en sistemas de alimentación adaptados a las condiciones de la Cornisa Cantábrica, esta tesis doctoral se llevó a cabo en tres bloques experimentales.

El primer experimento se realizó en la finca experimental del SERIDA de Grado (Asturias), en suelo de textura franco arcillosa, con un diseño en parcela dividida, con 3 repeticiones durante 3 años consecutivos. Los cultivos invernales que constituyeron las parcelas principales fueron un testigo sin leguminosa (OL) y 3 leguminosas: haba (HB), altramuza blanca (ALT) y trébol violeta (TV) y las subparcelas las constituyeron un testigo sin cultivo (ONL), raigrás italiano (RI) y 2 crucíferas: nabo francés (NF) y colza forrajera (COL). Las alternativas forrajeras al RI se abonaron con estiércol (manejo sostenible) y el RI con fertilización química (convencional). Tras la cosecha en primavera se completó la rotación con maíz y se evaluó el efecto de las alternativas sobre su rendimiento y calidad, así como sobre las propiedades del suelo. Los resultados mostraron que COL y NF no son alternativas viables en las condiciones ensayadas. HB y HBRI igualaron en rendimiento al RI (6,5; 7,2 y 7,4 t MS ha⁻¹ para HB, RI y HBRI respectivamente) con la ventaja sobre RI de acumular la producción en un único corte y sin abono complementario. Las leguminosas presentaron mayores contenidos en proteína



bruta que RI con una adecuada fermentación (excepto TV) y buena estabilidad aeróbica. Ninguna alternativa influyó en el rendimiento ni en la calidad nutritiva del cultivo subsiguiente (maíz) en comparación con los resultados de la rotación clásica RI-maíz. Las parcelas con HB, TV y HBRI presentaron mejor calidad edáfica que el resto. En base a estos resultados, se seleccionaron HB y HBRI como cultivos de invierno alternativos al RI para rotar con maíz.

En el segundo experimento, las dos alternativas seleccionadas (HB y HBRI) se llevaron a gran parcela en la finca del SERIDA de Villaviciosa para ser evaluadas en 2 años consecutivos bajo criterios de sostenibilidad medioambiental utilizando abonado orgánico frente al cultivo convencional de RI. En todas ellas se utilizó maíz para completar la rotación. Se realizaron controles de producción y se tomaron muestras de forraje y de suelo. El cultivo más productivo fue HBRI con 9,2 t MS ha⁻¹ vs. 7,2 y 5,7 t MS ha⁻¹ para HB y RI respectivamente. HB y HBRI presentaron mejor ensilabilidad y estabilidad aeróbica que RI además de un elevado contenido de ácido linoleico. El diagnóstico de salud del agroecosistema fue mejor para los manejos con leguminosas tanto en el diagnóstico básico como en el avanzado.

En el último experimento, los ensilados de RI, HB y HBRI fueron empleados durante 2 años consecutivos en ensayos de alimentación de vacuno lechero realizados en el SERIDA. Se utilizaron 9 vacas frisonas, distribuidas al azar en 3 grupos, en un diseño en cuadrado latino de 3 dietas x 3 períodos. Cada periodo constó de 14 días de adaptación a la dieta y 7 de control y muestreo de ingestión y producción de leche. Los tratamientos consistieron en 3 raciones (TMR) formuladas con los ensilados en estudio junto con paja y concentrado. Las TMR se ofertaron *ad libitum* además de 18 horas diarias de pastoreo y un concentrado en el ordeño. No se observaron diferencias en las ingestiones de TMR, concentrado ni hierba. Las dietas no afectaron la producción ni la composición de la leche, excepto en contenido de urea, con una excreción superior en la dieta con HB (309 vs. 225 y 260 mg L⁻¹ para HB, RI y HBRI respectivamente). El perfil de ácidos grasos (AG) fue más saludable en la leche de vacas alimentadas con TMR con HB, con un contenido en ácidos grasos saturados significativamente menor (76,45 vs. 79,46 y 79,95 g 100 g⁻¹ d de AG para HB, HBRI y RI respectivamente) y un contenido de ácido linoleico conjugado mayor que la leche producida con las otras dietas.

RESUMEN (en inglés)

The dairy sector faces toward the challenge of increasing its production facing of growing demand for food at the same time it should be more efficient in the use of natural resources, replacing usual agricultural practices for others more sustainable ones. Feeding systems based on forages are economically more competitive than those based on concentrates. Therefore, to improve the dairy sector profitability, complying at the same time with environmental requirements, the change actions should be oriented to modify the Italian



ryegrass crop conventional management by the inclusion of other species with similar yield, but more sustainable.

These new winter alternative forages will be integrated into the dairy cows feeding in order to improve the milk quality. Based on these premises and with the aim of expanding the agricultural frontier by introducing new winter forage crops to rotate with maize in dairy cow feeding systems adapted to the conditions of the Cantabrian Coast, this doctoral thesis was carried out in three experimental trials.

The first trial was carried out in the SERIDA experimental farm located in Grado (Asturias), on a loam-clay texture soil. It was used a split plot design, with 3 replications during 3 consecutive years. The main plots were constituted by a control without legume (0L) and 3 legumes: faba bean (HB), white lupine (ALT) and red clover (TV) and the subplots were constituted by an uncultivated control (0NL), Italian ryegrass (RI) and 2 cruciferous: camelina (NF) and rapeseed (COL). Alternative forages to RI were fertilized with manure (sustainable management) and the RI was fertilized with chemical fertilizers (conventional). After the harvest in spring, the rotation was completed with maize crop with the purpose to evaluate the effect of the alternative forages on yield and quality. Properties of soil were also evaluated. The results showed that COL and NF are not viable alternatives to replace the RI under the conditions tested. HB and HBRI equalled to RI in yield (6.5, 7.2 and 7.4 t DM ha⁻¹ for HB, RI and HBRI respectively) with the advantage over the RI of accumulating their yield in only one cut and without the necessity of complementary fertilization. All legumes tested (except TV) showed higher contents in crude protein than RI, with suitable fermentation and good aerobic stability. None alternative influenced in the yield or nutritive quality of the subsequent crop (maize) compared with the results obtained in the conventional rotation (RI-maize). Plots with HB, TV and HBRI presented better edaphic quality than the other ones alternatives tested. On the basis of these results HB and HBRI were selected as alternative winter crops to RI to rotate with maize.

In the second trial, the two selected alternatives in the previous trial (HB and HBRI) were cultivated into a farm plot of SERIDA at Villaviciosa during two consecutive years and under environmental sustainability criteria (using organic fertilization) against the RI crop under conventional management. In all of them maize was used to complete the rotation. Production controls were carried out and forage and soil samples were taken. The most productive crop was HBRI with 9.2 t DM ha⁻¹ vs. 7.2 and 5.7 t MS ha⁻¹ for HB and RI respectively. HB and HBRI showed better ensilability and aerobic stability than RI in addition to a high content of linoleic acid. Soil's health diagnosis of the agroecosystem was better for sustainable management in both basic and advanced diagnosis.



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

In the last trial, RI, HB and HBRI silages were used in feeding trials of dairy cows during 2 consecutive years in the SERIDA farm. Nine Holstein-Friesian cows were used. Cows were randomly assigned in 3 groups, following a 3x3 Latin square design with 3 diets x 3 periods. Each period was composed of 14 days of adaptation to the diet and 7 days of control and sampling of ingestion and milk production. The treatments consisted of 3 rations (TMR) formulated with the silages in study together with straw and concentrate. TMRs were offered *ad libitum* in addition to 18 hours of grazing daily and a concentrate during milking. No differences were observed in intakes of TMR, concentrate or grass. The diets did not affect the production or composition of the milk, except for urea content, with a higher urea excretion in the HB diet (309 vs. 225 and 260 mg L⁻¹ for HB, RI and HBRI respectively). Fatty acid profile (AG) was healthier in milk from cows fed TMR with HB, with a significantly lower content of saturated fatty acids (76.45 vs. 79.46 and 79.95 g 100 g⁻¹ d of AG for HB, HBRI and RI respectively) and a higher content of conjugated linoleic acid than milk produced with the HBRI and RI diets.

SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO
EN _____

La presente tesis doctoral ha sido desarrollada en el Servicio de Investigación y Desarrollo Agroalimentario del Principado de Asturias (SERIDA), en el Área de Nutrición de Pastos y Forrajes y dentro del Grupo de Investigación de Nutrición y Sanidad Animal (NySA).



Tabajo financiado por el Instituto Nacional de investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) a través del proyecto RTA-2012-00065-C05-01 y cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Silvia Baizán González ha sido beneficiaria de un contrato predoctoral de Formación de Personal Investigador en Agroalimentación en los Centros de Investigación Agraria y Alimentaria INIA-CCAA (FPI-INIA), financiado por el Instituto Nacional de investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y vinculado al proyecto RTA-2012-00065-C05-01.

El Grupo de Investigación de Nutrición y Sanidad Animal (NySA) está financiado por el Plan de Ciencia, Tecnología e Innovación de Asturias (PCTI) 2018-2020 (IDI2018-000237) y cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	15
ÍNDICE DE FIGURAS	19
ÍNDICE DE TABLAS	23
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	25
ABREVIATURAS, SÍMBOLOS, SIGNOS Y ACRÓNIMOS.....	27
PREFACIO.....	33
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	37
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	43
2.1. SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DEL GANADO VACUNO LECHERO	43
2.2. EL SECTOR PRODUCTOR DE LECHE EN ASTURIAS	44
2.3. ROTACIÓN FORRAJERA CONVENCIONAL UTILIZADA EN ASTURIAS.....	46
2.4. POLÍTICA AGRARIA COMÚN (PAC) PARA EL PERÍODO 2015-2020.....	47
2.5. LAS LEGUMINOSAS Y SU POTENCIAL MULTIFUNCIONAL EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS SOSTENIBLES	50
2.6. LAS CRUCÍFERAS Y SU PAPEL EN LA CONSERVACIÓN DEL RECURSO SUELO.....	54
2.7. LECHE ENRIQUECIDA EN ÁCIDOS GRASOS POLIINSATURADOS A TRAVÉS DE LA ALIMENTACIÓN CON FORRAJES.....	55
2.8. LA UTILIZACIÓN SOSTENIBLE DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA EXPLOTACIÓN	55
3. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL	59
4. LEGUMINOSAS FORRAJERAS EN MONOCULTIVO O EN ASOCIACIÓN CON OTRAS ESPECIES COMO ALTERNATIVA VIABLE AL CULTIVO INVERNAL DE RAIGRÁS ITALIANO PARA ROTAR CON MAÍZ	63
4.1. INTRODUCCIÓN	63
4.2. MATERIAL Y MÉTODOS	64
4.2.1. Localización del ensayo	64
4.2.2. Características climáticas y edafológicas del área de estudio	65
4.2.3. Material vegetal	66
4.2.3.1. Descripción de las especies forrajeras utilizadas en este ensayo:.....	66
4.2.3.2. Especies y cultivares (cv.) empleados en el ensayo:	74
4.2.4. Diseño experimental	74
4.2.5. Manejo aplicado a los cultivos de invierno	76
4.2.5.1. Laboreo, abonado y dosis de siembra.....	76
4.2.5.2. Aprovechamiento de los cultivos.....	77
4.2.5.3. Control de producción.....	77
4.2.6. Manejo aplicado al cultivo de verano	78

4.2.6.1. Laboreo, abonado y dosis de siembra.....	78
4.2.6.2. Aprovechamiento del cultivo	79
4.2.6.3. Control de producción.....	79
4.2.7. Toma de muestras.....	80
4.2.7.1. Muestras de suelo	80
4.2.7.2. Muestras de material vegetal	80
4.2.8. Determinaciones analíticas	81
4.2.8.1. Propiedades fisicoquímicas del suelo	81
4.2.8.2. Forrajes.....	82
4.2.9. Análisis estadístico	84
4.3. RESULTADOS	85
4.3.1. Condiciones termopluviométricas	85
4.3.2. Forrajes verdes.....	87
4.3.3. Ensilados.....	92
4.3.4. Cultivo de verano	98
4.3.5. Conjunto de la rotación.....	99
4.3.6. Suelo.....	102
4.4. DISCUSIÓN.....	104
4.5. CONCLUSIONES	110
5. RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL ENSILADO DE HABA FORRAJERA EN MONOCULTIVO O EN INTERCULTIVO CON RAIGRÁS ITALIANO	113
5.1. INTRODUCCIÓN	113
5.2. MATERIAL Y MÉTODOS	114
5.2.1. Localización del ensayo	114
5.2.2. Características climáticas y edafológicas del área de estudio	114
5.2.3. Material vegetal	115
5.2.4. Diseño Experimental	116
5.2.5. Manejo aplicado a los cultivos de invierno	116
5.2.5.1. Laboreo, abonado y dosis de siembra.....	116
5.2.5.2. Aprovechamiento de los cultivos de invierno	117
5.2.5.3. Control de producción.....	118
5.2.6. Manejo aplicado al cultivo de verano	120
5.2.6.1. Laboreo, abonado y dosis de siembra.....	120
5.2.6.2. Aprovechamiento del cultivo de verano	120
5.2.7. Toma de muestras.....	121
5.2.7.1. Muestras de suelo	121

5.2.7.2. Muestras de material vegetal	121
5.2.8. Determinaciones analíticas	122
5.2.8.1. Propiedades químicas del suelo	122
5.2.8.2. Diagnóstico de salud del suelo	122
5.2.8.3. Forrajes	125
5.2.9. Análisis estadístico	125
5.3. RESULTADOS	126
5.3.1. Condiciones termopluviométricas	126
5.3.2. Forrajes verdes	126
5.3.3. Ensilados	129
5.3.4. Suelo	132
5.4. DISCUSIÓN	139
5.5. CONCLUSIONES	145
6. EVALUACIÓN DEL ENSILADO DE HABA FORRAJERA EN MONOCULTIVO O EN INTERCULTIVO CON RAIGRÁS ITALIANO EN LA ALIMENTACIÓN DE VACUNO LECHERO	149
6.1. INTRODUCCIÓN	149
6.2. MATERIAL Y MÉTODOS	150
6.2.1. Localización del ensayo	150
6.2.2. Diseño Experimental	152
6.2.2.1. Animales	154
6.2.2.2. Tratamientos o dietas	154
6.2.3. Control de la ingestión de alimentos y de la producción de leche	155
6.2.3.1. Ingestión de TMR y pienso suplementario	155
6.2.3.2. Ingestión de hierba	156
6.2.3.3. Producción de leche	159
6.2.4. Toma de muestras	159
6.2.4.1. Ensilados, TMR y pienso suplementario	159
6.2.4.2. Hierba	159
6.2.4.1. Leche	160
6.2.5. Determinaciones analíticas	161
6.2.5.1. Alimentos y forraje verde	161
6.2.5.2. Leche	161
6.2.6. Análisis estadístico	162
6.3. RESULTADOS	163
6.3.1. Características de las parcelas de pastoreo	163
6.3.2. Composición química de las dietas ofertadas	163

6.3.2.1. Valor nutritivo y aporte energético.....	163
6.3.2.2. Contenido en ácidos grasos	166
6.3.3. Ingestión de alimentos	166
6.3.4. Producción y composición de la leche	168
6.4. DISCUSIÓN.....	171
6.5. CONCLUSIONES	177
7. RECAPITULACIÓN FINAL Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	181
7.1. RECAPITULACIÓN FINAL	181
7.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	182
8. CONCLUSIONES	187
8.1. CONCLUSIONES GENERALES:	187
8.2. CONCLUSIÓN FINAL:.....	188
BIBLIOGRAFÍA.....	191
PRODUCCIÓN CIENTÍFICA.....	213
I. PUBLICACIONES EN REVISTAS DE IMPACTO (JRC) O CON EVALUACIÓN PREVIA (PEER REVIEW).....	213
II. COMUNICACIONES A CONGRESOS.....	215
II.I. Internacionales:.....	215
II.II. Nacionales:.....	215
III. ARTÍCULOS DIVULGATIVOS:	217
IV.INFORMES TÉCNICOS:.....	217
V. JORNADAS DE DIFUSIÓN:.....	217

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Título</u>	<u>Página</u>
2.1	Procedencia de los alimentos en cuatro sistemas de alimentación. P: pastoreo; SH: ≤20% de la SAU destinada a maíz para ensilar; SHSM: 20-75% de la SAU destinada a maíz para ensilar y SM: ≥75% de la SAU destinada a maíz para ensilar. Fuente: Santiago <i>et al.</i> (2015)	44
2.2	Porcentaje de ganaderos con entregas de leche por Comunidades Autónomas según el informe mensual de situación del sector lácteo en España publicado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación en abril de 2019. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos Informe de Coyuntura del Sector Vacuno de Leche (MAPA, 2019)	45
4.1	Localización de la finca experimental utilizada. Fuente: Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (https://sig.mapama.gob.es/siga/)	65
4.2	Esquema de la distribución de los forrajes en la finca experimental según un diseño en parcela dividida con tres repeticiones y cuya asignación se repitió durante los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015). OLONL: vegetación espontánea; RI: raigrás italiano; HB: haba forrajera; TV: trébol violeta; ALT: altramuz blanco; NF: nabo francés; COL: colza forrajera; HBRI: intercultivo haba-raigrás; TVRI: intercultivo trébol-raigrás; ALTRI: intercultivo altramuz-raigrás; HBNF: intercultivo haba-nabo; TVNF: intercultivo trébol-nabo; ALTNF: intercultivo altramuz-nabo; HBCOL: intercultivo haba-colza; TVCOL: intercultivo trébol-colza y ALTCOL: intercultivo altramuz-colza	75
4.3	Diagramas ombrotérmicos del área experimental durante los 12 años previos a este estudio (2000-2012) y de los tres años agronómicos (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015) del ensayo. El número de días de lluvia por mes se indica en la parte inferior de cada columna	86
4.4	Rendimientos medios (kg MS ha ⁻¹) de los forrajes alternativos de invierno comparados frente al raigrás italiano (RI). OLONL: vegetación espontánea; HB: haba forrajera; TV: trébol violeta; ALT: altramuz blanco; NF: nabo francés; HBRI: intercultivo haba-raigrás; TVRI: intercultivo trébol-raigrás; ALTRI: intercultivo altramuz-raigrás; HBNF: intercultivo haba-nabo; TVNF: intercultivo trébol-nabo y ALTNF: intercultivo altramuz-nabo. Los valores corresponden a la media de los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015). No se incluye la colza (ni en monocultivo ni en intercultivo con otras especies) al no haberse establecido en ningún año de estudio. Los resultados del RI se calcularon como media ponderada de los dos cortes realizados en primavera. ***: p≤0,001; ns: no significativo (p>0,05)	88

<u>Figura</u>	<u>Título</u>	<u>Página</u>
4.5	Estabilidad aeróbica (variación de pH y temperatura en °C) de los micro ensilados de los forrajes en monocultivo ensayados (haba forrajera -HB-, trébol violeta -TV-, altramuz blanco -ALT- y nabo francés -NF-) tras la apertura y exposición a la temperatura ambiente durante un período de 10 días comparados frente al raigrás italiano (RI). Los valores corresponden a la media de los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014, 2014-2015), excepto para ALT que se corresponde con los años 2013-2014 y 2014-2015 y para NF que se corresponde únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014). La temperatura ambiente promedio durante el período de exposición fue de $20 \pm 1^\circ\text{C}$	96
4.6	Estabilidad aeróbica (variación de pH y temperatura en °C) de los micro ensilados de los forrajes en intercultivo ensayados (haba-raigrás italiano -HBRI-, haba-nabo francés -HBNF-, trébol violeta-raigrás italiano -TVRI-, trébol violeta-nabo francés -TVNF-, altramuz-raigrás -ALTRI- y altramuz-nabo francés -ALTNF-) tras la apertura y exposición a la temperatura ambiente durante un período de 10 días comparados frente al raigrás italiano (RI). Los valores corresponden a la media de los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014, 2014-2015), excepto para ALTRI que se corresponde con los años 2013-2014 y 2014-2015 y para HBNF, TVNF y ALTNF que se corresponden únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014). La temperatura ambiente promedio durante el período de exposición fue de $20 \pm 1^\circ\text{C}$	97
4.7	Rendimientos medios (kg MS ha ⁻¹) del cultivo de verano (maíz forrajero -M-) en función del cultivo precedente: raigrás italiano (RI), vegetación espontánea (OLONL), haba forrajera (HB), trébol violeta (TV), altramuz blanco (ALT), nabo francés (NF) y sus intercultivos con RI o NF (HBRI, TVRI, ALTRI, HBNF, TVNF y ALTNF). Las alternativas se compararon estadísticamente frente a la producción del maíz en la cual el cultivo precedente fue RI. Los valores corresponden a la media de los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015), excepto para el altramuz (en monocultivo e intercultivo con otras especies), que se corresponde con los años 2013-2014 y 2014-2015 y para el nabo francés (en monocultivo e intercultivo con otras especies) que se corresponde únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014). No se incluye la colza (ni en monocultivo ni en intercultivo con otras especies) al no haberse establecido en ningún año de estudio. ns: no significativo ($p>0,05$)	98

Figura	Título	Página
4.8	Rendimientos en materia seca (MS), proteína bruta (PB), materia orgánica digestible (MOD) en kg ha ⁻¹ y energía metabolizable (EM) en GJ ha ⁻¹ del conjunto de la rotación forrajera. Raigrás italiano (RI), vegetación espontánea (OLONL), haba forrajera (HB), trébol violeta (TV), altramuz blanco (ALT) y nabo francés (NF), sus intercultivos con RI o NF (HBRI, TVRI, ALTRI, HBNF, TVNF y ALTNF) y maíz forrajero (M) durante los años agronómicos 2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015 excepto para el altramuz (en monocultivo e intercultivo con otras especies), que se corresponde con los años 2013-2014 y 2014-2015 y para el nabo francés (en monocultivo e intercultivo con otras especies) que se corresponde únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014). No se incluye la colza (ni en monocultivo ni en intercultivo con otras especies) al no haberse establecido en ningún año de estudio. ***: p≤0,001; **: p≤0,01; *: p≤0,05; ns: no significativo (p>0,05)	101
5.1	Localización de la finca experimental utilizada en el ensayo a nivel de explotación de la presente tesis. Fuente: Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (http://sig.mapama.gob.es/siga/)	115
5.2	Esquema de la distribución de los cultivos forrajeros en las subparcelas. Se repitió la misma asignación cultivo x subparcela los dos años agronómicos de estudio (2014-2015 y 2015-2016). RI: raigrás italiano; HB: haba forrajera y HBRI: intercultivo haba-raigrás	117
5.3	Producción forrajera (kg MS ha ⁻¹) de los forrajes de invierno: raigrás italiano (RI), haba forrajera (HB) e intercultivo haba-raigrás (HBRI) durante los dos años agronómicos de estudio (2014-2015 y 2015-2016). CL: corte de limpieza; 1C: primer corte; 2C: segundo corte; R: rebrote de RI. Letras distintas indican diferencias significativas entre tipo de forraje en el test de comparación de medias de Duncan (p<0,05)	127
5.4	Estabilidad aeróbica (variación de temperatura en °C y pH) de los ensilados de raigrás italiano (RI), haba forrajera (HB) e intercultivo de haba-raigrás (HBRI) tras la apertura y exposición a la temperatura ambiente durante un período de 10 días. Datos obtenidos en cámara de estabilidad aeróbica a temperatura ambiente controlada (20 ± 1°C) durante el período de exposición	132
5.5	Indicadores químicos e indicadores biológicos del suelo de las subparcelas objeto de estudio. RI-FQ: manejo convencional con cultivo de raigrás italiano y fertilización química; HB-FO: manejo alternativo con cultivo de haba forrajera (HB) y fertilización orgánica; HBRI-FO: manejo alternativo con intercultivo de haba-raigrás (HBRI) y fertilización orgánica; MO: materia orgánica; CN: relación carbono/nitrógeno; CICE: capacidad de intercambio catiónico	138

<u>Figura</u>	<u>Título</u>	<u>Página</u>
6.1	Localización de la Unidad de Leche (parcelas e instalaciones) del área de Nutrición, Pastos y Forrajes del Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario de Villaviciosa (Asturias). Fuente: Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (https://sig.mapama.gob.es/siga/)	151
6.2	Esquema de las fases experimentales (adaptación a la dieta y muestreo) y de las actividades diarias realizadas en cada período en los ensayos de alimentación <i>in vivo</i> en vacuno lechero (años 2015 y 2016)	153

ÍNDICE DE TABLAS

<u>Tabla</u>	<u>Título</u>	<u>Página</u>
4.1	Valor nutritivo, aporte energético y rendimientos por hectárea de los forrajes verdes de invierno y parámetros de ensilabilidad tras 24 horas de prehenificado	90
4.2	Perfil de ácidos grasos (g 100 g ⁻¹ AG) del forraje verde de las alternativas de invierno evaluadas (en monocultivo o en intercultivo)	91
4.3	Valor nutritivo, aporte energético y parámetros fermentativos del ensilado de los forrajes de invierno ensayados	93
4.4	Perfil de ácidos grasos (g 100 g ⁻¹ AG) del ensilado de las alternativas forrajeras de invierno evaluadas (en monocultivo o en intercultivo)	94
4.5	Valor nutritivo y aporte energético del cultivo de verano (maíz forrajero)	100
4.6	Propiedades fisicoquímicas del suelo bajo vegetación espontánea (OLONL), raigrás italiano (RI), haba forrajera (HB), trébol violeta (TV) y altramuz blanco (ALT) en monocultivo y sus intercultivos con RI (HBRI, TVRI y ALTRI)	103
5.1	Indicadores (básicos y avanzados) utilizados para evaluar el estado de los servicios edáficos	123
5.2	Condiciones climáticas durante los periodos vegetativos de los cultivos forrajeros de invierno y verano en los años agronómicos 2014-2015 y 2015-2016	126
5.3	Valor nutritivo, aporte energético y perfil de ácidos grasos de los forrajes verdes de invierno y parámetros de ensilabilidad tras su prehenificado	128
5.4	Valor nutritivo, aporte energético, parámetros fermentativos y perfil de ácidos grasos del ensilado de los forrajes de invierno ensayados	130
5.5	Propiedades químicas del suelo de las subparcelas objeto de estudio	133
5.6	Diagnóstico “básico” de los servicios edáficos principales, según las Tarjetas de Salud de los Agrosistemas Pascícolas (TSAP)	135
5.7	Diagnóstico “avanzado” de los servicios edáficos principales, según las Tarjetas de Salud de los Agrosistemas Pascícolas (TSAP)	136
6.1	Composición porcentual de ingredientes de las raciones totales mezcladas (TMR) en los dos ensayos de alimentación realizados (años 2015 y 2016)	154
6.2	Características de las praderas destinadas al pastoreo de las vacas lecheras en cada periodo de los ensayos de alimentación realizados en 2015 y 2016	164

<u>Tabla</u>	<u>Título</u>	<u>Página</u>
6.3	Valor nutritivo y contenido energético de las raciones completas mezcladas (TMR) ofertadas en la estabulación en los tres tratamientos, del pienso suplementario aportado durante el ordeño y del forraje verde consumido en pastoreo de las vacas lecheras durante los ensayos de alimentación realizados en 2015 y 2016	165
6.4	Perfil de ácidos grasos (g 100 g ⁻¹ AG) de las raciones totales mezcladas (TMR) ofertadas a vacas lecheras	167
6.5	Peso vivo corporal inicial y final, ganancia de peso vivo, consumos de materia seca de vacas Holstein en función de la ración total mezclada (TMR) ofertada <i>ad libitum</i> en la estabulación y complementada con 18 h de pastoreo	167
6.6	Producción y composición de la leche de vacas Holstein en función de la ración completa mezclada (TMR) ofertada formuladas con ensilado de raigrás italiano, haba forrajera e intercultivo de haba-raigrás	168
6.7	Perfil de ácidos grasos (g 100 g ⁻¹ de AG) de la leche de vacas Holstein consumiendo raciones totales mezcladas (TMR) ofertada formuladas con ensilado de raigrás italiano, haba forrajera e intercultivo de haba-raigrás	170

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

<u>Fotografía</u>	<u>Título</u>	<u>Página</u>
4.1	Parcela sembrada con raigrás italiano (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) en monocultivo (izquierda) y detalle de una espiga de la planta (derecha)	67
4.2	Parcela sembrada con haba forrajera (<i>Vicia faba</i> L.) en monocultivo (izquierda) y detalle de las inflorescencias de la planta (derecha)	68
4.3	Parcela sembrada con trébol violeta (<i>Trifolium pratense</i> L.) en monocultivo (izquierda) y detalle de las hojas y de la flor de la planta (derecha)	69
4.4	Parcela sembrada con altramuz blanco (<i>Lupinus albus</i> L.) en monocultivo (izquierda) y detalle de las hojas y de las inflorescencias de la planta (derecha)	70
4.5	Parcela sembrada con nabo francés (<i>Camelina sativa</i> L.) en monocultivo (derecha) y detalle de su inflorescencia (derecha)	71
4.6	Parcela sembrada con colza forrajera (<i>Brassica napus</i> L.) en monocultivo (izquierda) y detalle de la floración de la planta (derecha)	72
4.7	Panorámica de un ensayo de variedades de maíz forrajero (<i>Zea mays</i> L.) realizado en el SERIDA de Villaviciosa (izquierda) y detalle de la mazorca (derecha)	73
4.8	Control de producción de los cultivos de invierno: corte de limpieza del borde (arriba-izquierda), corte transversal (arriba-derecha), pesaje del forraje (abajo-izquierda) y medición del corte transversal con un hipsómetro digital (abajo-derecha)	78
4.9	Control de producción del cultivo de verano (maíz forrajero): pesaje del forraje (izquierda) y medición de la longitud de las líneas de muestreo con un hipsómetro digital (derecha)	79
4.10	Vista panorámica de la finca experimental utilizada en la presente tesis en la que se muestra el aspecto de los cultivos de invierno en el momento previo a la cosecha de primavera en el año agronómico 2014-2015	87
5.1	Control de producción del cultivo de raigrás italiano. Delimitación de la superficie de muestreo mediante un listón de aluminio (izquierda) e imagen de la zona de muestro tras la toma de muestra (derecha)	119

<u>Fotografía</u>	<u>Título</u>	<u>Página</u>
5.2	Control de producción del cultivo de haba forrajera. Delimitación del área de muestreo (1 m ²) mediante varillas de fibra de vidrio (izquierda) y de la zona de muestro tras la toma de muestra (derecha)	119
5.3	Material utilizado para la medida del tiempo de infiltración (izquierda), compactación (centro) y emisión de CO ₂ (derecha) del suelo según los protocolos descritos en las Tarjetas de Salud de los Agroecosistemas Pascícolas (TSAP)	125
6.1	Sistema de control de ingestión de las raciones TMR (izquierda) y robot de ordeño (derecha)	156
6.2	Medición de la altura del pasto (izquierda) y control de producción (derecha) de las praderas utilizadas en el ensayo de alimentación de la presente tesis	160

ABREVIATURAS, SÍMBOLOS, SIGNOS Y ACRÓNIMOS

OL	Testigo sin leguminosa
OLONL	Vegetación espontánea
ONL	Testigo sin cultivo
1C	Primer corte
2C	Segundo Corte
A	Año
ACE	Ácido acético
ADAS	<i>Agricultural Development and Advisory Service</i> (Servicio Nacional de Asesoramiento Agropecuario)
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
AFRC	<i>Agricultural and Food Research Council</i> (Consejo de Investigación Agropecuaria y Alimentaria)
AG	Ácido graso
AGI	Ácido graso insaturado
AGMI	Ácido graso monoinsaturado
AGPI	Ácido graso poliinsaturado
AGS	Ácido graso saturado
Al_{CICE}	Aluminio en el complejo de cambio
ALM	Almidón
ALT	Altramuz blanco
ALTCOL	Intercultivo altramuz-colza
ALTNF	Intercultivo altramuz-nabo
ALTRI	Intercultivo altramuz-raigrás
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (análisis de varianza)

AOAC	<i>Association of Official Agricultural Chemists</i> (Asociación de Químicos Agrícolas Oficiales)
ARC	<i>Agricultural Research Council</i> (Consejo de Investigación Agrícola)
AZSOL	Azúcares solubles
BOE	Boletín Oficial del Estado
BQ	Índice de diversidad de mesofauna
BUT	Ácido butírico
C/N	Relación carbono/nitrógeno
CC	Capacidad de campo
CE	Conductividad eléctrica
CEN	Cenizas
Cfb	Clima oceánico
CFN	Cultivos fijadores de nitrógeno
CICE	Capacidad de intercambio catiónico
CICYTEX	Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura
CL	Corte de limpieza
CLA	Ácido linoleico conjugado
COL	Colza forrajera
Csb	Clima mediterráneo con influencia oceánica según la clasificación climática de Köppen-Geiger
CT	Capacidad tampón
cv.	Cultivar
D	Días de gestación
d	Distancia recorrida en metros
d_a	Densidad aparente
De	Digestibilidad enzimática

DEMO	Digestibilidad enzimática de la materia orgánica neutro detergente celulasa
DMO	Digestibilidad de la materia orgánica
Do	Digestibilidad <i>in vivo</i> de la MO estimada por el método de la FND
Dvivo	Digestibilidad <i>in vivo</i> de la materia orgánica
EE	Extracto etéreo
eer	Error estándar residual
EM	Energía metabolizable
EN	<i>European Norme</i> (Norma Europea)
ENAC	Entidad Nacional de Acreditación
EN_d	Energía neta de debida a la actividad de desplazamiento
EN_g	Energía neta de gestación
EN_{hierba}	Contenido energético de la hierba consumida en pastoreo
EN_L	Energía neta para lactación
EN_i	Energía neta de debida al cambio de peso corporal
EN_m	Energía neta de mantenimiento
EN_p	Energía neta de debida a la actividad de pastoreo
EN_{pienso}	Aporte de energía diario del pienso
EN_{pv}	Energía neta de debida al cambio de peso corporal
EN_{TMR}	Aporte de energía diario de la TMR
ESM	Extracto seco magro
F	Forraje
FAD	Fibra ácido detergente
FAO	<i>Food and Agricultural Organization of the United Nations</i> (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
FB	Fibra bruta

FND	Fibra neutro detergente
FO	Fertilización orgánica
FQ	Fertilización química
H'	Índice de diversidad funcional de Shannon
HB	Haba forrajera
HBCOL	Intercultivo haba-colza
HBNF	Intercultivo haba-nabo
HBRI	Intercultivo haba-raigrás
IE	Índice de ensilabilidad
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comisión Electrotécnica Internacional)
INRA	<i>Institut National de la Recherche Agronomique</i> (Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organización Internacional para la Estandarización)
k	Constante
LAC	Ácido láctico
LC	Límite de cuantificación
LCG	Leche estandarizada por grasa y energía
LILA	Laboratorio Interprofesional Lechero Asturiano
M	Maíz Forrajero
MAFF	<i>Ministry of Agriculture, Fisheries and Food</i> (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación)
MAPA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
MELN	Materiales extractivos libres de nitrógeno
MO	Materia orgánica
MOD	Materia orgánica digestible

MOS	Materia orgánica del suelo
MS	Materia seca
MSI	Materia seca ingerida
msnm	Metros sobre el nivel del mar
MV	Materia verde
NA	No analizada
NAC	Nitrato amónico cálcico
NBF	Nitrógeno biológico fijado
NF	Nabo francés
NIRS	<i>Near-Infrared Reflectance Spectroscopy</i> (Espectroscopía del infrarrojo cercano)
NRC	<i>National Research Council</i> (Consejo Nacional de Investigación)
ns	No significativo
p	p-valor
P1	Período 1
P2	Período 2
P3	Período 3
PAC	Política Agraria Común
PB	Proteína bruta
PRO	Ácido propiónico
PTN	Peso del ternero al nacimiento
PV	Peso vivo
qCO₂	Cociente metabólico
R	Rebrote de RI
RD	Real Decreto

RI	Raigrás italiano
rsd	<i>Residual standard deviation</i> (desviación estándar residual)
SAU	Superficie agraria útil
SERIDA	Servicio Regional de investigación y Desarrollo Agroalimentario
SIE	Superficie de interés ecológico
T0	Propiedades del suelo al comienzo del experimento
TMR	<i>Total Mixed Ration</i> (ración completa mezclada)
TSAP	Tarjetas de Salud de los Agroecosistemas Pascícolas
TV	Trébol violeta
TVCOL	Intercultivo trébol-colza
TVNF	Intercultivo trébol-nabo
TVRI	Intercultivo trébol-raigrás
UF	Unidades fertilizantes
UNE	Una Norma Española
Σ	Sumatorio
ω	Omega

PREFACIO

La presente tesis doctoral se encuentra estructurada en 8 capítulos, que se resumen a continuación:

En el Capítulo 1, *Introducción general*, se incluye una justificación del problema que se pretende resolver y la importancia económica, social y ambiental del mismo. Asimismo, se presentan algunos de los principales antecedentes que ayudan a entender más en detalle el marco en que se ha desarrollado este trabajo.

En el Capítulo 2, *Revisión bibliográfica*, se recoge información relevante sobre los temas que se tratan en la tesis como son el sector lácteo, el potencial de las leguminosas y las crucíferas como alternativas forrajeras sostenibles, la Política Agraria Común y la reutilización de los residuos generados en la explotación.

En el Capítulo 3, *Objetivos y planteamiento experimental*, se recogen los objetivos a alcanzar durante el desarrollo de la tesis y los experimentos planteados para lograr dichos objetivos.

En el Capítulo 4, *Leguminosas forrajeras en monocultivo o en asociación con otras especies como alternativa viable al cultivo invernal de raigrás italiano para rotar con maíz*, se describe el planteamiento experimental y los criterios de selección de los cultivos que serán implantados en gran parcela. Se recoge también una somera descripción de cada una de las especies forrajeras utilizadas en esta tesis.

En el Capítulo 5, *Rendimiento y calidad del ensilado de haba forrajera en monocultivo o en intercultivo con raigrás italiano*, se describe la caracterización agronómica y los efectos sobre la calidad del suelo de las alternativas seleccionadas en parcela experimental.

En el Capítulo 6, *Efecto de la inclusión de ensilado de haba forrajera en la dieta de vacuno lechero sobre la ingestión voluntaria y la producción y composición de la leche*, se describe el efecto de los forrajes seleccionados como alternativa sostenible al raigrás italiano sobre el producto final: la leche de vacuno.

En el Capítulo 7, *Recapitulación final y futuras líneas de investigación*, se hace una síntesis de las observaciones más destacadas a lo largo del todo el proceso experimental y se exponen algunas de las posibles líneas de investigación a realizar a corto y medio plazo como continuación del trabajo iniciado en la presente tesis doctoral.

En el Capítulo 8, *Conclusiones*, se enumeran las conclusiones del trabajo realizado, acorde con los distintos capítulos de la tesis doctoral y se presenta una conclusión final que aúna a todas las demás y que se deriva de todo el trabajo realizado en la tesis.

Posteriormente, en la *Bibliografía*, se presentan ordenadas alfabéticamente por autor las diferentes referencias bibliográficas consultadas durante la elaboración de esta tesis.

Por último, en *Producción científica*, se incluyen las publicaciones en revistas científicas indexadas y evaluadas por pares, así como las diferentes comunicaciones enviadas a congresos nacionales e internacionales con los resultados parciales obtenidos a lo largo de este trabajo. También se incluyen otras colaboraciones en artículos divulgativos, informes técnicos y jornadas de difusión.

CAPÍTULO 1

Introducción general

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La eliminación de la cuota láctea en abril de 2015 situó a los productores de leche ante un nuevo escenario que tiene asociado la oportunidad de incrementar la producción, pero también la amenaza de una mayor volatilidad en los precios y de inseguridad en la comercialización (Vázquez y García, 2018). Por otro lado, la Unión Europea, con la Política Agraria Común (PAC), persigue una agricultura más respetuosa con el medio ambiente con la utilización de prácticas cada vez más sostenibles. Ante esta nueva situación, los ganaderos, dependientes de las ayudas que llegan de Europa para mantener la rentabilidad de sus explotaciones, se ven obligados a implantar nuevos sistemas de producción de leche de vacuno que cumplan con estos requisitos ambientales bajo estándares de seguridad y sanidad que garanticen la calidad de los productos. Para ello, es necesario producir el litro de leche al más bajo coste posible sin comprometer la salud y la eficiencia productiva del rebaño. Esto conlleva reducir al mínimo la dependencia de factores externos como la compra de alimentos, a través de la máxima inclusión en la ración de forrajes producidos en la misma explotación (Martínez-Fernández, 2016), y de fertilizantes nitrogenados, mediante la reutilización de los residuos orgánicos generados por los animales como purines y/o estiércol.

En la Cornisa Cantábrica en general, y en Asturias en particular, se dan las condiciones idóneas para el desarrollo de pastos y forrajes, ya que se combinan una elevada pluviometría y gran humedad medioambiental la mayor parte del año, con temperaturas medias suaves, sobre todo en la zona costera, que permiten obtener una buena producción forrajera, tanto en cantidad como en calidad. Sin embargo, las explotaciones se ven limitadas por la reducida base territorial de la que disponen para cultivar los forrajes y por la marcada estacionalidad de su producción. Estas limitaciones, han impulsado a muchos ganaderos a adoptar estrategias para intensificar la producción forrajera, utilizando alternativas forrajeras anuales de alto rendimiento que conservadas mediante ensilado permiten garantizar la máxima cobertura de la ración forrajera de su ganado en base a producciones propias. El sistema más habitual es la rotación formada por maíz (*Zea mays* L.), como el cultivo de verano, y raigrás italiano (*Lolium multiflorum* Lam.) como cultivo de invierno. Esta rotación, es altamente productiva pero no cumple con los requisitos ambientales actuales, ya que constituye un abuso de gramíneas, es muy exigente en abonos nitrogenados y, repetida de forma continuada, tiene un efecto negativo sobre la fertilidad del suelo (Jiménez-Calderón *et al.*, 2017). Por lo tanto, se hace necesaria la búsqueda de nuevas alternativas igual de rentables, pero más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

El cultivo de maíz es difícilmente reemplazable en las explotaciones asturianas. Ningún otro cultivo de verano (girasol, sorgo, soja, etc.) es capaz de alcanzar la misma producción sin regadío en los cuatro-cinco meses que dura su desarrollo (Flores *et al.*, 2000; Martínez-Fernández *et al.*, 2011). Por ello, el margen de actuación debe centrarse en sustituir el tradicional cultivo de invierno, el raigrás italiano, por otro cultivo, solo o asociado, igual de productivo pero que además mejore la calidad de los suelos, reduzca el uso de insumos y aumente la biodiversidad en el entorno de los cultivos, tanto de la microbiota de la tierra como de la fauna (lombrices y polinizadores entre otros), al tiempo que mejore la capacidad de resiliencia de la tierra al cambio climático y a sus efectos (erosión, pérdida de nutrientes y capacidad de almacenamiento de CO₂). En este sentido, existe un renovado interés en toda Europa por la recuperación del cultivo de leguminosas, familia botánica con un perfil ecológico clave para la agricultura y el medioambiente debido a su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico y por ser relativamente ricas en proteína.

Para afrontar estos cambios orientados a la protección del medioambiente, la PAC (2015-2020) introdujo un pago, como suplemento del pago básico, denominado pago verde o “*greening*”, por la realización de prácticas agrícolas beneficiosas para el clima y el medio ambiente. Estas prácticas consisten en actuaciones sencillas generalizadas, de carácter anual, tales como la diversificación de cultivos, el mantenimiento de pastos permanentes y contar con superficies de interés ecológico en las explotaciones. Además, se concede una ayuda a los agricultores que produzcan determinados cultivos (proteaginosas, leguminosas y oleaginosas) con el objetivo de contribuir a la autonomía alimentaria del sector ganadero, basada en los cultivos de alto contenido proteico con destino a la alimentación animal, limitando así la dependencia de las importaciones de tortas proteicas (BOE, 2014).

La calidad del forraje de una explotación puede ser un factor determinante de la cantidad y calidad de la leche producida en la misma. Por ello, las alternativas seleccionadas para sustituir al raigrás italiano como cultivo de invierno, además de ser especies y variedades apropiadas para la zona, deben ser apetecibles para el ganado de manera que la capacidad de ingestión y la producción no se vean afectadas. No deben repercutir negativamente en los parámetros fisicoquímicos que afectan al pago por calidad y, sería interesante, que pudieran generar un valor añadido al producto en el mercado, como por ejemplo la mejora del perfil lipídico. En este aspecto, vuelven a cobrar importancia las leguminosas, ya que se ha demostrado que estas especies son capaces de transferir su contenido en ácidos grasos

poliinsaturados a la grasa de la leche de forma más eficiente que las gramíneas (Kalac y Samková, 2010).

En base a todo lo anterior, y con el fin de identificar y optimizar un sistema de aprovisionamiento de forrajes invernales y producción de alimentos para el ganado de calidad, que suponga una reducción de insumos de producción, que permita el reciclado de nutrientes y la preservación de recursos naturales, se planteó esta tesis de investigación.

Se pretende que los resultados obtenidos sirvan a los ganaderos para alcanzar la competitividad del sector productor de leche ligada a la calidad, a la seguridad alimentaria y a la innovación, reduciendo los costes de producción, aumentando la rentabilidad y mejorando los componentes funcionales de la leche buscando la sostenibilidad económica y ambiental del sector productor de leche de vacuno ante las condiciones de la PAC (2015-2020) vinculada al pago por superficie.

CAPÍTULO 2

Revisión bibliográfica

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DEL GANADO VACUNO LECHERO

El manejo de los rebaños lecheros conlleva elevados costes de producción en las explotaciones, siendo el de alimentación el más importante, ya que supone por término medio en torno al 40% del producto bruto, el 60% del total de gastos y más del 80% de los costes variables (Álvarez y Pérez, 2010). Aunque la producción animal debería ser independiente del efecto negativo que tienen las oscilaciones de los precios de mercado de las materias primas para piensos sobre los costes de producción, los elevados costes de las materias primas han llevado al sector productor de leche en los últimos años hacia una crisis de rentabilidad. Cabe destacar, que los márgenes económicos en las explotaciones se mantienen principalmente gracias a las ayudas de la PAC, ya que el margen de beneficios sobre la producción ha descendido progresivamente desde el entorno del 27% a finales de los años noventa al 7% del año 2010 (Intxaurrendieta *et al.*, 2012). Esta complicada situación, está forzando al sector a buscar alternativas para mejorar su rentabilidad, elaborando estrategias para reducir costes sobre todo en alimentación, que permitan producir leche al más bajo coste posible por gastos de alimentación, sin comprometer la salud y la eficiencia reproductiva de los animales.

El pastoreo representa el sistema de alimentación con menor coste para los ganaderos debido a que el forraje pastoreado es la fuente más barata de nutrientes (Doyle y Stockdale 2011; Elgersma, 2015). Además, favorece el bienestar de las vacas al ofrecer una mayor libertad para sus comportamientos como la rumia, estar echadas, menor comportamiento agresivo, etc. (Arnott *et al.*, 2017). Como ya se ha mencionado anteriormente, la Cornisa Cantábrica, y concretamente el Principado de Asturias, poseen unas condiciones edafoclimáticas que favorecen la producción de los pastos y forrajes. Pero, esta producción herbácea es estacional y la calidad nutritiva del pasto es muy variable, por tanto, en vacas de alta producción, es necesario complementar el consumo de pasto con raciones completas mezcladas (*Total Mixed Rations*, TMR) integradas por mezcla de forrajes conservados y concentrado para aumentar la eficiencia del pastoreo y, con ello, la producción de leche por parte de las vacas.

En un estudio realizado en Asturias por Santiago *et al.* (2015), se comprobó que las explotaciones lecheras asturianas producen mayoritariamente sus propios forrajes, pero la totalidad del concentrado aportado en la TMR es de origen externo (Figura 2.1), lo que les confiere escasa sostenibilidad económica. La razón de esta dependencia externa de concentrado

se debe a que el sistema convencional de producción de forraje para ensilar, rotación raigrás italiano-maíz forrajero, aporta un bajo contenido proteico a la ración (Pereira *et al.*, 2009), por lo que los ganaderos están obligados a comprar fuera los ingredientes que precisan para realizar un buen racionamiento.

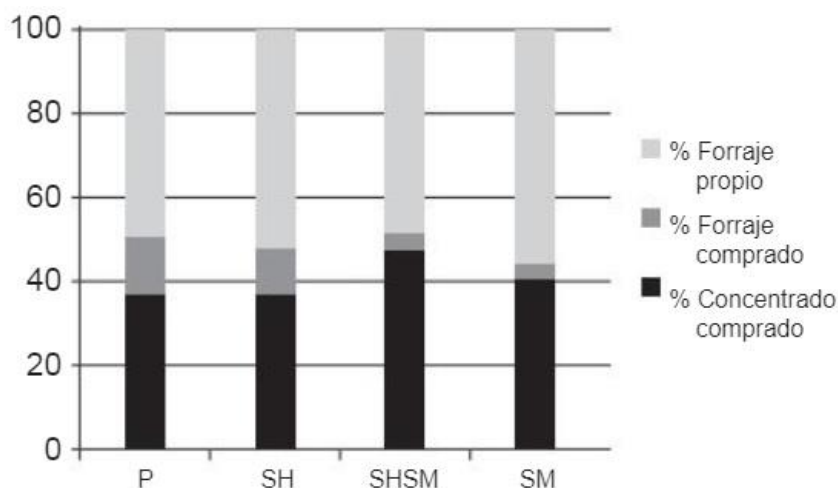


Figura 2.1. Procedencia de los alimentos en cuatro sistemas de alimentación. P: pastoreo; SH: $\leq 20\%$ de la superficie agraria útil (SAU) destinada a maíz para ensilar; SHSM: 20-75% de la SAU destinada a maíz para ensilar y SM: $\geq 75\%$ de la SAU destinada a maíz para ensilar. Fuente: Santiago *et al.* (2015).

2.2. EL SECTOR PRODUCTOR DE LECHE EN ASTURIAS

La Cornisa Cantábrica concentra el 77% del total de ganaderos con entregas declaradas de leche en España, de las cuales Asturias representa el 13% (MAPA, 2019). Estas cifras convierten a esta región en la segunda comunidad española por número, por detrás de Galicia (Figura 2.2). Y es que, la tradición ganadera sigue teniendo un fuerte arraigo en Asturias a pesar de las sucesivas crisis de las últimas décadas. Según los datos del último informe de Declaraciones Obligatorias del Sector Vacuno de Leche, publicado por el Fondo Español de Garantía Agraria, en el Principado quedan en la actualidad 1.713 ganaderos lácteos (FEGA, 2019).

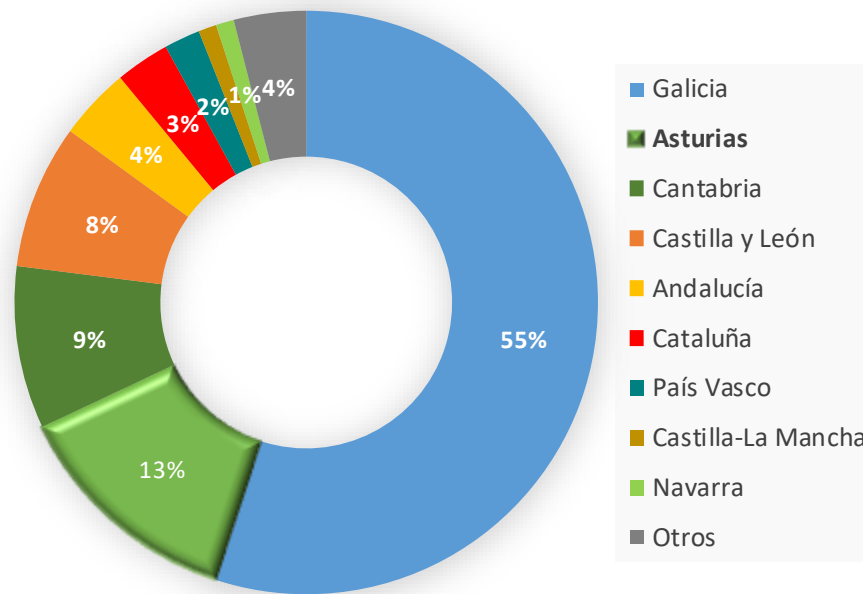


Figura 2.2. Porcentaje de ganaderos con entregas de leche por Comunidades Autónomas según el informe mensual de situación del sector lácteo en España publicado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación en abril de 2019. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos Informe de Coyuntura del Sector Vacuno de Leche (MAPA, 2019).

Esta fuerte presencia del sector lácteo en Asturias, se debe en gran medida a que las condiciones edafoclimáticas de esta región son óptimas para la producción de leche. El clima oceánico característico en esta zona, con temperaturas suaves y lluvias distribuidas uniformemente a lo largo del año, favorece la producción de pastos y forrajes. En consecuencia, el manejo de la alimentación de vacuno lechero se basa en el uso de forrajes conservados mediante ensilado y de concentrados (Morales Almaraz *et al.*, 2011). Además, las vacas lecheras prefieren ambientes con temperaturas entre 5-25°C, conocida como la zona termoneutra (Kadzere *et al.*, 2001). Según Arango y Fernández (2011), y el informe técnico sobre la estructura y sistemas de alimentación de las explotaciones lecheras de Galicia, Cornisa Cantábrica y Navarra publicado por Flores *et al.* (2017), la descripción de los sistemas de producción de leche de Asturias se fundamenta en el tipo de superficie forrajera que utiliza la explotación y, dentro de esta, la proporción de maíz forrajero existente en relación a la superficie agraria útil (SAU) total. De esta manera la evaluación económica de las explotaciones de leche de vaca en Asturias muestra una gran dependencia de la SAU destinada al cultivo de maíz forrajero. Sin embargo, la reducida base territorial de la que se dispone en Asturias para la producción de alimentos forrajeros, junto con la estacionalidad de dicha producción, es uno de los factores estructurales limitantes más importantes en el incremento de la rentabilidad de las explotaciones en la

Cornisa Cantábrica. Por tanto, el sistema de producción de forraje más habitual es la rotación de cultivos.

2.3. ROTACIÓN FORRAJERA CONVENCIONAL UTILIZADA EN ASTURIAS

La rotación de cultivos más habitual en Asturias, debido a su elevada productividad, es la formada por raigrás italiano (*Lolium multiflorum* Lam.) como cultivo de invierno y maíz forrajero (*Zea mays* L.) como cultivo de verano, repitiéndose de forma continuada en el tiempo. Con este sistema se obtienen producciones de 20-25 t MS ha⁻¹ año⁻¹, frente a las 11-15 de las praderas y 7-8 de los prados (Martínez-Fernández *et al.*, 2008). La parte principal de la rotación es el maíz, ya que, aunque es escasa la tierra disponible para su cultivo al requerir terrenos sin pendiente situados a una altitud máxima de 650 msnm, es el único cultivo que sin regadío puede producir 12-20 t de MS ha⁻¹ año⁻¹ en tan solo cuatro-cinco meses como resultado de la habilidad de la planta de maíz en la absorción, asimilación y utilización del nitrógeno durante el crecimiento vegetativo y la posterior movilización de este nitrógeno adquirido hacia la espiga durante el período de maduración del grano (Muchow, 1998; Below, 2002). Por ese motivo, no interesa sustituirlo por otros cultivos como el girasol, sorgo, soja, etc. que son menos productivos. Sin embargo, esta rotación, es muy exigente en abonados nitrogenados, y, repetida de forma continuada, tiene un efecto negativo sobre la fertilidad del suelo (Martínez-Fernández *et al.*, 2014). De hecho, el raigrás italiano como cultivo invernal de la rotación, ha ido perdiendo interés paulatinamente ya que presenta algunos inconvenientes, como la dificultad para dar el primer corte de primavera si las condiciones climatológicas son adversas, el encarecimiento de los gastos del cultivo en un sistema de varios cortes, las pérdidas de valor proteico y posibilidades de encamado cuando se da un solo corte y la baja concentración de proteína bruta del conjunto de la rotación (Fernández-Lorenzo *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2009). Estas consideraciones sugieren que donde se debe actuar para mejorar la gestión de la producción forrajera es sobre el cultivo de invierno, buscando alternativas viables al raigrás italiano (Flores *et al.*, 2000). En esta búsqueda de alternativas forrajeras, es necesario plantear estrategias de manejo menos agresivas con el medio ambiente, encaminando la investigación sobre forrajes y cultivos forrajeros hacia nuevas formas de producción, que garanticen un uso eficiente de los mismos, y modelos de manejo adaptados a las nuevas condiciones económicas y políticas relativas al desarrollo de una agricultura productora de alimentos de calidad, seguros, a precios asequibles y con modelos de producción de bajo impacto ambiental (Peeters *et al.*, 2006). Esto implica utilizar cultivos energéticamente más eficientes, con bajos requerimientos de insumos, menos demandantes de agua y que no degraden la microbiota del suelo agrícola. Para ello, se

deben investigar alternativas forrajeras que tengan una producción abundante en primavera, con concentración energética y proteica no limitante, que tengan rendimientos comparables o superiores al raigrás italiano y sobre todo que puedan aprovecharse en un solo corte. Así mismo deben mejorar la gestión de la alimentación del vacuno de leche y disminuir la compra de los concentrados necesarios para elaborar la ración, además de asegurar una composición de leche conforme a los requerimientos nutricionales actuales.

2.4. POLÍTICA AGRARIA COMÚN (PAC) PARA EL PERÍODO 2015-2020

El 19 de diciembre de 2015 entró en vigor el Real Decreto 1075/2014, sobre la aplicación a partir de esta fecha de los pagos directos a la agricultura y a la ganadería y otros regímenes de ayuda, así como sobre la gestión y control de los pagos directos y de los pagos al desarrollo rural. Este documento establece un sistema de pagos directos, basados en el régimen de pago básico y otros regímenes de ayuda. En línea con los nuevos retos ligados a la mejora del comportamiento medioambiental del sector agrario y a la prevención del cambio climático, en dicho Real Decreto, se introduce un nuevo pago como suplemento del pago básico denominado “pago verde”, “ecologización” o “*greening*” por prácticas agrícolas beneficiosas para el clima y el medioambiente. Este pago se corresponde con un porcentaje del valor total de los derechos de pago básico que active el agricultor cada año (para poder cobrar este pago es necesario cobrar el pago base). Dicho porcentaje es ligeramente superior al 50%, aunque debe ser determinado anualmente. Para que un agricultor pueda percibir este pago verde, debe de respetar tres prácticas medioambientales en todas sus hectáreas admisibles, cuando sea pertinente. Las prácticas medioambientales vinculadas a este pago son:

- Diversificación de cultivos.
- Mantenimiento de los pastos permanentes existentes.
- Contar con superficies de interés ecológico (SIE) en las explotaciones.

La **diversificación de cultivos** consiste en sembrar varios cultivos diferentes en la tierra de cultivo de la explotación. Se entiende como tal, a la tierra de labor ocupada por cultivos herbáceos, en secano o regadío. La diversificación de cultivos obliga a que:

- Si la tierra de cultivo de la explotación cubre entre 10 y 30 ha, se deben cultivar, al menos, dos tipos de cultivos diferentes sin que el principal suponga más del 75% de dicha tierra de cultivo.

- Si la tierra de cultivo de la explotación cubre más de 30 ha, debe haber, al menos, tres cultivos diferentes, sin que el principal suponga más del 75% de dicha tierra de cultivo y los dos cultivos mayoritarios juntos no podrán ocupar más del 95% de la misma.

De especial importancia para el sector lácteo en la Cornisa Cantábrica son las parcelas que tienen una rotación de dos cultivos en el año, como, por ejemplo, raigrás en invierno y maíz en verano. En estos casos hay que tener en cuenta que solo se puede declarar un cultivo por parcela o recinto, y que el periodo de declaración debe de coincidir con el periodo de verificación.

Estarán exentos de la diversificación de cultivos los siguientes tipos de explotaciones:

- Las explotaciones en las que más del 75% de las tierras de cultivo estén ocupadas por cultivos herbáceos, en los que se incluye el raigrás, siempre que la tierra de cultivo restante (el otro 25%) no exceda las 30 ha.
- Explotaciones en las que más del 75% de la superficie agrícola admisible (es decir, la dedicada a tierras de cultivo, pastos permanentes o cultivos permanentes) sea utilizada como pasto permanente, o para la producción de hierba, u otros forrajes herbáceos, o a una combinación de estos usos, siempre que la tierra de cultivo restante (el otro 25%) no exceda las 30 ha.
- Por último, los umbrales máximos requeridos en la práctica de diversificación (no más del 75% el cultivo principal y del 95% los dos cultivos mayoritarios juntos) no serán de aplicación cuando más del 75% de las tierras de cultivo esté cubierto por hierba u otros forrajes herbáceos. En tal caso, el cultivo principal de la tierra de cultivo restante (el otro 25%) no deberá cubrir más del 75% de dicha tierra de cultivo, excepto si la misma está cubierta por hierba u otros forrajes herbáceos.

El mantenimiento de **pastos permanentes** existentes se comprobará contabilizando la superficie de pastos a nivel nacional y no individualmente. Ello implica, que si la superficie declarada dedicada a pastos permanentes en comparación con la superficie agraria declarada total disminuyera en más de un 5% con respecto a la proporción del año 2015 (que se tomará como de referencia), se deberán tomar medidas para restaurar el nivel de referencia de pastos permanentes y se vería afectado el pago verde de los agricultores.

Para dar cumplimiento a la práctica de contar con **superficies de interés ecológico** en las explotaciones se deberá garantizar que, cuando la explotación cuente con más de 15 ha de tierra de cultivo, al menos el 5% de dicha tierra si las hubiera, estarán dedicadas a alguna de las cuatro categorías de SIE por las que España ha optado. Se considera SIE, a las siguientes categorías de superficies:

- Las tierras en barbecho que no se dediquen a la producción durante, al menos, nueve meses consecutivos desde la cosecha anterior, y en el período comprendido entre el mes de octubre del año previo al de la solicitud y el mes de septiembre del año de la solicitud. Además, las superficies de barbecho que pretendan computarse como SIE no deberán haber estado precedidas por ningún cultivo fijador de nitrógeno.
- Las superficies dedicadas a cultivos fijadores de nitrógeno (CFN). Se consideran como tales las leguminosas para consumo humano o animal: judía, garbanzo, lenteja, guisante, habas, altramuz, algarroba, titarros, almorta, veza, yeros, alholva, alverja, alverjón, alfalfa, esparceta y zulla.
- Las superficies forestadas en el marco de los programas de desarrollo rural, de conformidad con el artículo 31 de Reglamento (CE) n° 1257/1999 del Consejo, de 17 de mayo de 1999, con el artículo 43 del Reglamento (CE) n° 1698/2005 del Consejo, de 20 de septiembre de 2005, o con arreglo al artículo 22 de Reglamento (UE) n° 1305/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de diciembre de 2013, durante el transcurso del correspondiente compromiso adquirido por el agricultor.
- Las superficies dedicadas a agrosilvicultura que reciban, o hayan recibido, ayudas en el marco de los programas de desarrollo rural, en virtud del artículo 44 del Reglamento (CE) n° 1698/2005 del Consejo, de 20 de septiembre de 2005, o del artículo 23 del Reglamento (UE) n° 1305/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de diciembre de 2013, o de ambos.

Para la medición de las hectáreas que computarán como SIE, se han establecido unos factores de ponderación según el beneficio medioambiental que reporta cada una de las categorías de SIE. En tres de ellas el factor de ponderación es igual a la unidad, solo los CFN se multiplicarán por un factor igual a 0,7. De tal manera que se necesitarán 1,43 ha de CFN para contar con 1 ha de SIE.

Tendrán derecho automáticamente al pago verde aquellos agricultores que se dedican a la agricultura ecológica y los acogidos al régimen de pequeños agricultores que se haya adherido al mismo en el año 2015.

Además, con el objetivo de contribuir a la autonomía alimentaria del sector ganadero basada en los cultivos de alto contenido proteico con destino a su utilización en alimentación animal, se concederá una ayuda asociada a los agricultores que produzcan los siguientes cultivos:

- Proteaginosas: guisante, habas y altramuces dulce.
- Leguminosas: veza, yeros, algarrobas, titarros, almortas, alholva, alverja, alverjón, alfalfa (solo en superficies de secano), esparceta y zulla.
- Oleaginosas: girasol, colza, soja, camelina y cártamo.

Algunos aspectos limitantes de este Real Decreto, como que las mezclas de CFN con otro tipo de cultivos que no tengan la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico al suelo no se consideran SIE, han sido modificados, con posterioridad, en el Real Decreto 980/2017, de 10 de noviembre. Con esta modificación se permite, a efectos de las SIE, la siembra de CFN mezclados con otros cultivos que no tengan la capacidad de fijar nitrógeno, siempre que el CFN sea predominante en la mezcla.

2.5. LAS LEGUMINOSAS Y SU POTENCIAL MULTIFUNCIONAL EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS SOSTENIBLES

Según estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), está previsto que la población mundial supere los 9.100 millones en 2050, lo que implica que se tendrá que aumentar un 70% la producción de alimentos, sin posibilidad de aumento de la superficie cultivable y de una forma respetuosa con el medio ambiente (FAO, 2017). Por tanto, el uso eficiente de los recursos naturales y la adaptación al cambio climático, serán los principales retos de la agricultura mundial en las próximas décadas.

Con el fin de superar dichos retos, la Política Agraria Común (PAC) de la Unión Europea (UE), para el periodo 2015-2020 (Real Decreto 1075/2014), como ya se ha detallado en el apartado 2.4 de este capítulo, promueve la revalorización de los recursos forrajeros propios mediante ayudas directas a los agricultores procedentes del llamado pago verde o “*greening*” incorporando en las tierras de cultivo nuevas especies que garanticen la sostenibilidad del medio ambiente y que a su vez permitan alcanzar la autosuficiencia proteica de forma que se limite la

dependencia de insumos externos como la soja; una de las principales desventajas en la producción agraria de la UE.

En este escenario de creciente demanda de alimentos unida a una preocupación creciente por el medio ambiente y la seguridad alimentaria, las leguminosas tienen un papel fundamental que jugar (Rubiales, 2016) al brindar múltiples servicios en línea con los principios de sostenibilidad (Lüscher *et al.*, 2014; Stagnari *et al.*, 2017; Atienza y Rubiales, 2017).

La familia de las leguminosas (*Leguminosae* o *Fabaceae*) está constituida por más de 700 géneros y cerca de 20.000 especies (Ferrer, 2016) con un amplio rango de distribución. Su gran diversidad y determinados aspectos de su fisiología las convierte en cultivos capaces de proporcionar numerosos servicios agroecosistémicos, constituyendo una de las familias botánicas más importantes desde el punto de vista socioeconómico, con notables implicaciones en agricultura, medio ambiente y alimentación (Clemente, 2016).

Uno de los aspectos más destacables de las leguminosas es que sus raíces tienen la capacidad de asociarse simbióticamente con ciertas bacterias del suelo, generalmente del género *Rhizobium*, formando unos nódulos que permiten a la planta tomar directamente el nitrógeno del aire y fijarlo al suelo de forma que pueda ser asimilado por la planta (Ramírez-Bahena, 2016). La cantidad de nitrógeno biológico fijado (NBF) por las leguminosas puede variar de 100 a 380 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en regiones templadas y boreales (Ledgard y Steele, 1992) y dependerá de varios factores como, la eficiencia planta-bacteria (Clemente, 2016), la especie, las propiedades del suelo o las condiciones ambientales (N'Dayegamiye *et al.*, 2015). Gracias a esta particularidad, son especies que mejoran la fertilidad edáfica (Rubiales, 2016), ya que ese nitrógeno se incorpora al suelo y, por tanto, se pueden reducir las cantidades de abonos nitrogenados necesarios para el cultivo, disminuyendo el coste económico y el impacto medioambiental negativo causado por el uso excesivo de fertilizantes inorgánicos (Lüscher *et al.*, 2014; Crème *et al.*, 2015; Clemente, 2016) así como la necesidad de insumos externos (Stagnari *et al.*, 2017).

El nitrógeno aportado por las leguminosas también puede ser utilizado por un cultivo asociado. Por ejemplo, en intercultivos con gramíneas (Ledgard y Steele, 1992) se ha demostrado que la transferencia de nitrógeno por parte de las leguminosas mejora la capacidad fotosintética y la productividad de las gramíneas de la mezcla (Liu *et al.*, 2016). La provisión de NBF también ejerce efectos positivos en el cultivo subsiguiente en el caso de la rotación de

cultivos, mejorando las condiciones de crecimiento y su calidad e incrementando su rendimiento (Rochon *et al.*, 2004; Jensen *et al.*, 2011; Preissel *et al.*, 2015; N'Dayegamiye *et al.*, 2015; Clemente, 2016). Estos beneficios agronómicos precultivo son los denominados “*nitrogen effect*” (Peoples *et al.*, 2009).

Por otro lado, están los denominados “*break crop effect*” que incluyen otros beneficios de las leguminosas que no están causados por la provisión de nitrógeno a partir de la fijación biológica ni por el ahorro de nitrógeno que proporciona un suministro a largo plazo para otros cultivos. Por ejemplo, las leguminosas son capaces de mejorar la estructura y materia orgánica del suelo (Köpke y Nemecek, 2010; Clemente, 2016) y, gracias a su raíz axonomorfa (o pivotante) y relativamente profunda, algunas especies como el altramuz blanco (*Lupinus albus* L.), son capaces de explorar los horizontes inferiores del suelo y bombear nutrientes (principalmente fósforo y potasio) y agua hacia la superficie de forma eficaz; aspecto muy importante considerando el interés por buscar nuevas especies y asociaciones competitivas en situaciones de estrés hídrico dentro de las estrategias de adaptación al cambio climático orientadas a una mejor gestión del agua (González-Hidalgo *et al.*, 2010; Stagnari *et al.*, 2017). Además, los exudados de sus raíces ejercen efectos fitotóxicos y alopáticos que pueden utilizarse para el control de malezas en los cultivos siguientes (Baldock *et al.*, 1981; Hesterman, 1988). Otros efectos beneficiosos de las leguminosas son su capacidad de romper los ciclos biológicos de insectos para evitar enfermedades y plagas, especialmente en las rotaciones con cereales, reduciendo así el uso de pesticidas (Köpke y Nemecek, 2010; Preissel *et al.*, 2015; Clemente, 2016) y su contribución a la biodiversidad de los ecosistemas (Clemente, 2016). Los cultivos de leguminosas, como el haba forrajera, atraen insectos polinizadores en la época de floración (Miguelañez, 2017), por lo que proporcionan un servicio ecológico indirecto al permitir la polinización cruzada de frutales cercanos como el manzano (Miñarro, 2014).

Como se describió anteriormente, la introducción de leguminosas en las rotaciones agrícolas ayuda a reducir el uso de fertilizantes y energía fósil en sistemas cultivables y, por consiguiente, a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂) y el óxido nitroso (N₂O) (Lemke *et al.*, 2007; Lüscher *et al.*, 2014), ejerciendo un efecto positivo frente al cambio climático. Se ha estimado que el ahorro de insumos es de aproximadamente 277 kg ha⁻¹ de CO₂ por año y que emiten de 5 a 7 veces menos GEI por unidad de superficie que otros cultivos. Además, el secuestro de carbono en el suelo es mucho mayor (Stagnari *et al.*, 2017).

Las leguminosas son una valiosa fuente de proteína vegetal, con un papel creciente en alimentación animal tanto incluidas en las formulaciones de piensos como en pastos y forrajes para producción de carne y leche de alta calidad (Rubiales, 2016, Stagnari *et al.*, 2017; Jiménez-Calderón *et al.*, 2017). Esto es debido a que, nutricionalmente, representan una fuente barata de proteína, lo que permite mejorar la eficiencia de los sistemas de producción en las explotaciones lecheras al reducir la necesidad de concentrados (Adesogan *et al.*, 2004; Cavallarin *et al.*, 2007; Borreani *et al.*, 2009; Martínez-Fernández *et al.*, 2017a). Además de su elevado contenido en proteína, algunas especies de leguminosas contienen otros compuestos (polifenoles y ácidos grasos) con efectos positivos en la alimentación de rumiantes. Por ejemplo, los polifenoles, son capaces de inhibir la oxidación de las grasas y mejorar la utilización de las proteínas de la dieta, incrementando así la eficiencia de producción de carne, lana y leche (Mueller-Harvey, 2006; Waghorn, 2008). Pueden ser utilizados como alternativas antiparasitarias (Frutos *et al.*, 2008; Lombardi *et al.*, 2015), disminuyendo el uso de medicamentos (Lüscher *et al.*, 2014) afectando positivamente a la sanidad de los rumiantes. También se ha descrito que los taninos condensados actúan como reductores de la emisión de ciertos contaminantes como nitrógeno y metano (Baumont *et al.*, 2016) y como limitantes de la degradabilidad de la proteína mejorando la calidad del ensilado (Copani *et al.*, 2014). En cuanto al contenido de ácidos grasos, Kalac y Samková (2010) informaron que las leguminosas forrajeras muestran una mayor eficiencia de transferencia de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) a la grasa de la leche bovina en comparación con las gramíneas. Por tanto, la inclusión de ensilados de estos cultivos en las raciones de vacas lecheras, podría mejorar el perfil lipídico de la leche desde el punto de vista de la salud humana.

A pesar de todos estos beneficios, el cultivo de leguminosas ha ido disminuyendo en los últimos años por varias razones, entre ellas, el coste relativamente bajo de los fertilizantes nitrogenados y la dificultad para elaborar un buen ensilado (Dewhurst *et al.*, 2003a). Para hacer frente a este problema, algunos estudios proponen el uso de intercultivos leguminosa-gramínea, ya que, con esta asociación podría mejorarse el proceso fermentativo y reducirse la degradación proteica (Copani *et al.*, 2014).

2.6. LAS CRUCÍFERAS Y SU PAPEL EN LA CONSERVACIÓN DEL RECURSO SUELO

Las brasicáceas (*Brassicaceae*) o crucíferas (*Cruciferae*) son una familia de angiospermas dicotiledóneas que se incluyen en el orden *Brassicales*. Consta de 350 géneros y más de 3.500 especies distribuidas principalmente en el hemisferio norte, en zonas con clima templado (Canals *et al.*, 2009). Tienen una gran importancia agronómica y económica debido a sus múltiples usos tanto en alimentación humana como animal, como condimentos, plantas ornamentales, biocomustibles, abonos verdes y fitorremediación.

Las crucíferas destacan por su rápido crecimiento. Son capaces de crecer en tierras muy pobres en humus, donde otros géneros no podrían implantarse. Utilizan y acumulan en su parte aérea reservas minerales que extraen del subsuelo con más facilidad que otras plantas. Particularmente, dejan azufre disponible en el suelo, elemento indispensable para la vida vegetal y animal. Sus sistemas radiculares profundos bombean nutrientes (especialmente P y K) de las capas profundas a las superficiales que posteriormente son liberados gradualmente durante el proceso de descomposición de las raíces, ejerciendo un efecto positivo en los suelos y sobre otras plantas. También secuestran nitratos evitando que estos se pierdan por lixiviación en suelos permeables en los intervalos entre cultivos principales. Además, tras aprovechar su parte aérea como forraje, su sistema radicular puede ser aprovechado como abono verde para mejorar la estructura del suelo (Martínez-Fernández *et al.*, 2017b).

Varias especies de brasicáceas son utilizadas en biofumigación ya que contienen glucosinolatos en sus tejidos (Kirkegaard y Sarwar, 1998). Estos compuestos, al hidrolizarse, producen sustancias (isotiocianatos) con efectos tóxicos y/o nocivos que pueden utilizarse para la desinfección de los suelos y para el control de insectos, hongos, nematodos y especies arvenses (Morra y Kirkegaard, 2002; Kirkegaard, 2014) reduciendo el uso de productos químicos.

Algunas especies como el nabo francés (*Camelina sativa* L.) se cultivan para producir aceite vegetal ya que sus semillas presentan niveles excepcionalmente altos (hasta un 45%) de ácidos grasos omega-3, lo cual es poco común en fuentes vegetales. El aceite es también muy rico en antioxidantes naturales, tales como el γ -tocoferol, que lo hacen muy estable y muy resistente a la oxidación. La vitamina E contenida en el aceite es aproximadamente $110 \text{ mg}^{-1} 100 \text{ g}^{-1}$. La harina de camelina (producto que queda después de la extracción del aceite), generalmente contiene 10-14% de grasa (aproximadamente 5% omega-3) y un 40% de proteína, lo que permite a esta especie competir con la soja (Pilgerman *et al.*, 2007).

2.7. LECHE ENRIQUECIDA EN ÁCIDOS GRASOS POLIINSATURADOS A TRAVÉS DE LA ALIMENTACIÓN CON FORRAJES

La composición en ácidos grasos (AG) de la leche depende del genotipo de la vaca y del estado de lactación, pero la manera más adecuada para influir en ella es el manejo de la nutrición. Se sabe que una dieta suplementada con lípidos de origen marino, aceites vegetales o semillas de oleaginosas ejerce un efecto positivo en la mejora del perfil lipídico de la leche (Dhiman *et al.*, 2000; Lock y Garnsworthy, 2003; Dewhurst *et al.*, 2006), ahora bien, esta opción encarece notablemente el coste de la alimentación. Por esta razón, entre otras de índole económica, medioambiental y de imagen de producto, existe un interés creciente en explorar en qué medida el consumo de pastos permitiría producir leche rica en los citados compuestos funcionales. Según Elgersma *et al.* (2006), la alimentación de las vacas de leche con forrajes representa la forma más natural, sostenible y económica de conseguir mejorar la calidad de la leche desde el punto de vista nutricional. En este sentido, los trabajos de Dewhurst *et al.* (2003b) y Shingfield *et al.* (2008), entre otros, indican que las leguminosas forrajeras ofrecidas como ensilado permiten mejorar la calidad dietética de la leche mediante la reducción del contenido en ácidos grasos saturados, el aumento de la concentración de poliinsaturados (en particular de omega-3) y la disminución del ratio omega-6/omega-3, aspectos todos de notable interés para lograr una dieta más saludable a través del consumo de leche y derivados lácteos. Las ventajas derivadas del empleo de ensilados de leguminosas forrajeras en la ración de vacas lecheras están sin embargo condicionadas al hecho de conseguir una buena calidad de conservación.

2.8. LA UTILIZACIÓN SOSTENIBLE DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA EXPLOTACIÓN

El nitrógeno es uno de los nutrientes más importantes que las plantas necesitan para crecer, por lo tanto, se necesita la adición de dicho elemento para aumentar los rendimientos y mantener la producción (IPCC, 2013). Sin embargo, el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados inorgánicos ha representado una grave amenaza para el medio ambiente y la salud humana (Ahmed *et al.*, 2017) ya que la tasa de aplicación de estos fertilizantes de síntesis tiene una estrecha relación con la acumulación de nitratos en las aguas superficiales y subterráneas, lo que amenaza la biodiversidad y causa la contaminación de las emisiones de gases de efecto invernadero (Ward, 2009). Además, la aplicación de N de manera continuada causa una disminución progresiva de la materia orgánica del suelo que afecta a sus propiedades físicas, químicas, bioquímicas y microbiológicas (Caravaca *et al.*, 2002).

Por estas razones, existe una necesidad urgente de cambiar los paradigmas existentes hacia prácticas agrícolas más sostenibles que apuntan a utilizar los recursos existentes de la manera más eficiente posible para asegurar rendimientos suficientes y reducir los impactos ambientales (Schlesinger, 2009). En este sentido, la utilización de los residuos orgánicos generados en la propia explotación ganadera como fertilizante constituye una oportunidad para transitar hacia la sostenibilidad ambiental y económica (Mangado *et al.*, 2009). Además de incrementar el contenido orgánico del suelo, realizan un importante aporte de nutrientes a éste, generando un aumento en el nivel de fertilidad como consecuencia del reciclado de los mismos, en especial nitrógeno y potasio (Demagnet *et al.*, 1999).

El estiércol es un subproducto valioso para la industria ganadera y una oportunidad sostenible y económica en los sistemas agrícolas (Perramon *et al.*, 2016). El uso de estiércol y purines como fertilizantes es una alternativa para reducir los aportes de fertilizantes inorgánicos sin reducir el rendimiento agrícola (Jiménez-Calderón *et al.*, 2018). Estos recursos proporcionan nutrientes a las plantas, materia orgánica al suelo y permiten completar el ciclo de nutrientes, haciendo que la parte del nitrógeno fijada por las leguminosas y recolectada como forraje pueda volver al suelo, donde estará disponible nuevamente para cultivos posteriores (Ren *et al.*, 2014). Su aplicación mejora las propiedades biológicas y fisicoquímicas del suelo y también son una fuente de energía y nutrientes para el ecosistema edáfico (Butler y Muir, 2006).

CAPÍTULO 3

Objetivos y planteamiento experimental

3. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL

En función de lo expuesto anteriormente, el **objetivo general** de la presente tesis doctoral es ampliar la frontera agrícola introduciendo nuevos cultivos forrajeros de invierno para rotar con maíz forrajero en sistemas de alimentación adaptados a las condiciones edafoclimáticas de la Cornisa Cantábrica, que incidan favorablemente en la fertilidad del suelo y que permitan desarrollar dietas que aseguren una composición de la leche de vacuno conforme a los requerimientos nutricionales actuales, en modelos forrajeros de reducido impacto ambiental y de bajos costes de alimentación.

Para alcanzar este objetivo general se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

1. Evaluar diferentes cultivos forrajeros de invierno (en cultivo monofito o en intercultivo) como alternativas viables al monocultivo de raigrás italiano y seleccionar aquellas que igualen o superen a éste en valor nutritivo, especialmente en el contenido proteico, sin que haya pérdida de producción y que sean menos exigentes en cuanto a fertilización, además de ejercer un efecto positivo en la salud del suelo.
2. Estudiar el comportamiento agronómico de las alternativas seleccionadas en gran parcela. Elaborar ensilados (que posteriormente serán utilizados para la alimentación de vacuno lechero) y comparar sus características nutritivas y fermentativas respecto a las del raigrás italiano. Evaluar el impacto de los dos tipos de manejo (convencional y sostenible) sobre la salud del agroecosistema.
3. Determinar la influencia del ensilado de los cultivos de invierno alternativos al raigrás italiano sobre los rendimientos productivos de vacas en lactación y la composición de la leche producida, especialmente en el perfil de ácidos grasos como posibles mejoradores de la calidad funcional de la leche.

Para alcanzar dichos objetivos parciales, la presente tesis se estructuró en tres experimentos bien diferenciados, dos de ellos de ámbito agronómico y un tercero de nutrición animal.

En el primer experimento, que está enfocado al cumplimiento del objetivo específico 1, se realizaron ensayos agronómicos en parcela experimental, durante tres años consecutivos,

con el fin de encontrar alternativas sostenibles al monocultivo de raigrás italiano en manejo convencional. Se evaluaron tres leguminosas forrajeras (haba forrajera, trébol violeta y atramuz blanco) y dos crucíferas (colza forrajera y nabo francés). Todas ellas en monocultivo o en intercultivo con las otras especies y manejadas con criterios de sostenibilidad ambiental.

Para la consecución del objetivo específico 2, en el segundo experimento, se realizaron ensayos agronómicos en gran parcela, durante dos años consecutivos, con las alternativas sostenibles seleccionadas en el primer experimento para evaluar su comportamiento agronómico y las características nutritivas y fermentativas a nivel de explotación de los ensilados resultantes. Dichos ensilados se destinaron a la alimentación de vacuno lechero con el fin de evaluar la ingestión de las alternativas forrajeras seleccionadas y la calidad del producto final (la leche).

Y en el tercer y último experimento, con la premisa de minimizar la compra de alimentación externa y mejorar la calidad del producto final, se realizaron dos ensayos de alimentación, en dos años consecutivos, con vacuno lechero y los ensilados obtenidos de los forrajes de gran parcela para comprobar su efecto sobre la ingestión, así como sobre la producción y composición de la leche.

CAPÍTULO 4

Leguminosas forrajeras en monocultivo o en asociación con otras especies como alternativa viable al cultivo invernal de raigrás italiano para rotar con maíz

4. LEGUMINOSAS FORRAJERAS EN MONOCULTIVO O EN ASOCIACIÓN CON OTRAS ESPECIES COMO ALTERNATIVA VIABLE AL CULTIVO INVERNAL DE RAIGRÁS ITALIANO PARA ROTAR CON MAÍZ

4.1. INTRODUCCIÓN

En las explotaciones lecheras del norte de España, la rotación de cultivos más habitual es la de raigrás italiano-maíz forrajero (*Lolium multiflorum* Lam. - *Zea mays* L.) debido a su elevada productividad, 20-25 t MS ha⁻¹ año⁻¹ frente a las 11-15 de las praderas y 7-8 de los prados (Martínez-Fernández *et al.*, 2008). Sin embargo, esta rotación, es muy exigente en abonados nitrogenados y, repetida de forma continuada, tiene un efecto negativo sobre la fertilidad del suelo (Martínez-Fernández *et al.*, 2014). El maíz puede considerarse la parte principal de la rotación por ser el único cultivo que, sin regadío y en la cornisa Cantábrica, puede producir de 12 a 20 t de MS ha⁻¹ año⁻¹ en tan solo cuatro-cinco meses (Baizán *et al.*, 2015). Por otro lado, el raigrás italiano como cultivo invernal de la rotación, ha ido perdiendo interés paulatinamente ya que presenta algunos inconvenientes, como la dificultad para dar el primer corte de primavera si las condiciones climatológicas son adversas, el encarecimiento de los gastos del cultivo en un sistema de varios cortes, las pérdidas de valor proteico, posibilidades de encamado cuando se da un solo corte y la baja concentración de proteína bruta del conjunto de la rotación (Fernández-Lorenzo *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2009). Estas consideraciones, sugieren que donde se debe actuar para mejorar la gestión de la producción forrajera es sobre el cultivo de invierno, buscando alternativas viables al raigrás italiano.

La necesidad de impulsar prácticas agrícolas sostenibles ha despertado el interés por la recuperación de las leguminosas ya que se considera que su uso aumenta la fertilidad edáfica y la productividad de las tierras de cultivo debido a la fijación de N atmosférico y el aporte de materia orgánica al suelo (N'Dayegamiye *et al.*, 2015), disminuyendo así el uso excesivo de fertilizantes minerales y sus consecuencias adversas (Báez *et al.*, 2013). Además, las leguminosas forrajeras son una excelente fuente de proteína para la producción animal y podrían producir mayores rendimientos en los cultivos posteriores y mejorar su calidad (N'Dayegamiye *et al.*, 2015; Botana *et al.*, 2016). Estos beneficios sobre los cultivos subsiguientes están relacionados con factores conocidos como "efectos de rotación" (Maloney *et al.*, 1999), que incluyen entre otros, la mejora en la eficiencia del uso del agua, en la humedad del suelo y la disponibilidad de nutrientes, en la estructura del suelo y la actividad microbiana, en la reducción de las malas hierbas y en la ruptura de los ciclos biológicos de los insectos para evitar enfermedades y efectos

fitotóxicos y alelopáticos (Baldock *et al.*, 1981; Hesterman, 1988). Sin embargo, la superficie de cultivo de leguminosas ha ido progresivamente disminuyendo como consecuencia del bajo coste de los fertilizantes y las dificultades para su cultivo y ensilado (Dewhurst *et al.*, 2003a).

Por otra parte, la utilización como fertilizante de los residuos orgánicos generados en la propia explotación ganadera representa otra oportunidad para transitar hacia la sostenibilidad ambiental y económica (Mangado *et al.*, 2009) en el marco de la bioeconomía y la economía circular. El uso de purín y estiércol como abono permite reciclar los residuos generados en la explotación y es a su vez una fuente de nutrientes (Jiménez-Calderón *et al.*, 2018) y una alternativa para disminuir el aporte de fertilizantes químicos sin reducir la producción agrícola (Jiménez *et al.*, 2014). La aplicación de materia orgánica procedente del estiércol como fertilizante mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo, promueve la actividad biológica, mantiene la calidad ambiental y es una forma económica y eficiente para incrementar la fertilidad como consecuencia del reciclado de nutrientes, en especial N y K (Demagnet *et al.*, 1999).

Por tanto, con este experimento se pretendió mejorar la gestión de la producción forrajera, en el conjunto de una rotación de dos cultivos por año con el maíz como cultivo de verano. Las actuaciones se realizaron sobre los cultivos de invierno, en busca de sustituciones viables al monocultivo de raigrás italiano. Para ello, se evaluaron diferentes especies de leguminosas (en monocultivo o en intercultivo con otras especies) con el fin de seleccionar aquellos cultivos que puedan igualar o superar al raigrás italiano en producción y valor nutritivo, especialmente en el contenido proteico, que sean menos exigentes en cuanto a fertilización y que sean capaces de ejercer un efecto positivo en la salud del suelo.

4.2. MATERIAL Y MÉTODOS

4.2.1. Localización del ensayo

El ensayo se llevó a cabo en una finca localizada en la estación experimental agraria de “La Mata” perteneciente al Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA) situada en Grado (43° 22' 39" N, 6° 04' 11" O, 65 msnm), en la zona interior de Asturias (Figura 4.1).

Leguminosas forrajeras en monocultivo o en asociación con otras especies como alternativa viable al cultivo invernal de raigrás italiano para rotar con maíz



Figura 4.1. Localización de la finca experimental utilizada. Fuente: Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (<https://sig.mapama.gob.es/siga/>).

4.2.2. Características climáticas y edafológicas del área de estudio

Según la clasificación climática de Köppen-Geiger, la zona donde se ubica el ensayo, se clasifica como *Csb*, que corresponde a un clima mediterráneo con influencia oceánica, de inviernos templados y húmedos y veranos secos. La temperatura tiene valores suaves, con una media anual de 14°C y la precipitación media anual es de 796 mm (climate-data.org). Dado que el clima es un factor que afecta en gran medida a la producción agraria, los datos de temperatura y precipitación fueron registrados diariamente mediante una estación termopluviométrica situada en la propia finca.

El experimento se estableció en un suelo de textura franco arcillo-arenosa (20,20% de arcilla; 16,87% de limo y 62,93% de arena) perteneciente al Orden Inceptisol, Suborden Udepts, Gran Grupo Dystrudepts y Subgrupo Fluvéntico Húmico (Soil Survey Staff, 2014).

4.2.3. Material vegetal

4.2.3.1. Descripción de las especies forrajeras utilizadas en este ensayo:

- **Raigrás italiano (*Lolium multiflorum* Lam.):**

El raigrás italiano (Fotografía 4.1) es la gramínea pratense más sembrada en la Cornisa Cantábrica (Piñeiro *et al.*, 2001), tanto en cultivo monofito como en mezclas con otras especies. Es una planta anual (variedades alternativas tipo Westerwold) o bienal (variedades no alternativas) que alcanza hasta 120 cm de altura. Las hojas son largas y anchas, de color verde claro, casi amarillento, con los nervios de la hoja más marcados y el envés muy brillante. Sus tallos son lisos o ásperos hacia su extremo superior y la base es de color rojizo. Tiene hojas con lígula membranosa de 1-2 mm y aurículas. La inflorescencia es en espiga dística y las espiguillas, con una sola gluma mútica y opuesta al raquis, tienen de 5 a 12 flores y lemmas con aristas largas.

Precisa de climas templados, resiste algo el frío, pero es muy sensible al calor y a la sequía por lo que crece poco en verano. Su sistema radicular es muy superficial. Prefiere suelos neutros y no tolera el encharcamiento. Responde muy bien a la fertilidad del terreno y al abonado nitrogenado. Es una especie de establecimiento rápido, muy competitiva con las malas hierbas y de elevada productividad; su rendimiento medio anual, en monocultivo, es de 10-15 t MS ha⁻¹. También es frecuente su asociación con otras especies como el trébol violeta (*Trifolium pratense* L.). Produce un forraje con elevado valor nutricional y, sobre todo, muy apetecible por los animales cuando es aprovechado segándolo en estado vegetativo (fase de desarrollo de la planta que alcanza de 1/3 a 2/3 de su tamaño final y cuyos rebrotes no llegan a encañar). Rebasado éste, espiga precozmente y pierde valor alimenticio rápidamente (Piñeiro y Pérez, 1992). Debido a su capacidad de rebrote, esta especie ha sido ampliamente utilizada en praderas de siega, aunque también es apta para el pastoreo. Presenta una elevada ensilabilidad relacionada con su alto contenido en azúcares. En el norte de España se siembra a finales de septiembre para obtener una buena producción primaveral (Muslera y Ratera, 1984; Canals *et al.*, 2009; Flores *et al.*, 2013; Ferrer, 2016).



Fotografía 4.1. Parcela sembrada con raigrás italiano (*Lolium multiflorum* Lam.) en monocultivo (izquierda) y detalle de una espiga de la planta (derecha).

- **Haba forrajera (*Vicia faba* L.):**

El haba forrajera (Fotografía 4.2) es una leguminosa forrajera anual de porte erecto que puede alcanzar los 150-200 cm de altura, algo carnosa y glauca. Posee hojas paripinnadas, con 1-3 pares de folíolos, en ocasiones con un apéndice terminal muy reducido, de más de 1 cm de anchura. Sus inflorescencias son pedunculadas, con pocas flores (1-5) blancas o rosáceas (según la variedad) salvo las alas que son negras. Tiene el cáliz truncado oblicuamente en su extremo, con dientes de tamaño desigual. Su fruto es una legumbre carnosa, alargada y glabra o con cortos pelos. Posee una fuerte raíz principal pivotante y muchas raíces laterales fibrosas que exploran hasta una profundidad de 90 cm desde la superficie, que le permite aprovechar los minerales del suelo. Gracias a su sistema radicular que bombea nutrientes y agua hacia la superficie de manera eficaz, puede enriquecer el suelo en humus y en nutrientes mejorando su capacidad de intercambio catiónico.

Es típica de climas templados ya que necesita temperaturas frescas para desarrollarse. Tolerancia mal las temperaturas extremas y prefiere los climas marítimos a los continentales. Es sensible a la falta de agua, especialmente desde la floración hasta el llenado de las vainas. Presenta pocas exigencias edáficas, aunque prefiere suelos neutros, profundos, frescos y bien drenados. Soporta cierta salinidad. Puede fijar más nitrógeno que otras especies de leguminosas en las mismas condiciones edáficas (150-320 kg N ha⁻¹ año⁻¹). Es una especie muy productiva, 5-8 t MS ha⁻¹ y presenta un alto contenido en azúcares solubles y en proteína (19% PB); factores que facilitan su posterior ensilado (Duc, 1997; Canals *et al.*, 2009; Multari *et al.*, 2015). Durante el desarrollo del cultivo requiere una atención especial, ya que es sensible a muchas plagas y

enfermedades, como la pudrición de la raíz, nematodos de tallo y también a la presencia de malas hierbas (Muehlbauer y Tullu, 1997).



Fotografía 4.2. Parcela sembrada con haba forrajera (*Vicia faba* L.) en monocultivo (izquierda) y detalle de las inflorescencias de la planta (derecha).

- **Trébol violeta (*Trifolium pratense* L.):**

El trébol violeta (Fotografía 4.3) es una especie pratense, de la familia de las leguminosas, perenne y que alcanza hasta 50 cm de altura. Es una planta vivaz, de porte erecto, de raíz principal pivotante y profunda con numerosas raíces secundarias, que desarrollan una corona cerca del nivel del suelo de la que surgen tallos erectos. Sus hojas son trifoliadas y vellosas, con folíolos ovales provistos de una mancha blanca en forma de V. Las inflorescencias son capítulos rosados o violáceos, de forma globular u ovoide, que nacen en los extremos de los tallos. Están agrupadas en cabezuelas umbeliformes abrazadas por las estípulas de las dos últimas hojas del tallo, con flores violáceas o púrpuras y legumbre ovoide con una sola semilla.

Necesita climas bastante húmedos, es muy resistente al frío, soporta algo la sombra y tolera bien el pastoreo. Vegeta en todo tipo de suelos, aunque prefiere suelos neutros y profundos. Es exigente en humedad edáfica pero no soporta los encharcamientos prolongados. Su distribución en España es muy amplia pero preferentemente se cultiva en praderas de León, norte de Aragón y, en menor medida, en la Cornisa Cantábrica y en regadíos de otras zonas. Su aprovechamiento principal es mediante siega y su rendimiento medio anual, en monocultivo, es de 8-15 t MS ha⁻¹. Si se pasta sola puede producir meteorismo en los rumiantes, por ello se recomienda asociarla a una gramínea, habitualmente raigrás italiano no alternativo. Tiene un alto valor nutritivo, elevada apetecibilidad y por su elevado contenido en azúcares (para ser una leguminosa) presenta también una alta digestibilidad. No obstante, no suele utilizarse como

alimento exclusivo para el ganado porque presenta una relación energía/proteína muy baja. También tiene un alto contenido en fitoestrógenos del tipo isoflavonas y sufre con frecuencia ataques de hongos (oídio, roya, etc.) en cuyo caso el ganado rechaza su heno. El trébol violeta puede ser también de interés en apicultura por lo cual estos trebolares pueden considerarse también como pastos melíferos (Muslera y Ratera, 1984; Canals *et al.*, 2009; Ferrer, 2016).



Fotografía 4.3. Parcela sembrada con trébol violeta (*Trifolium pratense* L.) en monocultivo (izquierda) y detalle de las hojas y de la flor de la planta (derecha).

- **Altramuz blanco (*Lupinus albus* L.):**

El altramuz blanco (Fotografía 4.4) es una leguminosa anual de porte erecto que puede alcanzar 120 cm de altura. Sus tallos son gruesos, ramificados y ligeramente sedosos. Las hojas son alternas, compuestas por 5-9 folíolos, lisas en la cara superior y vellosas en la inferior. Las inflorescencias son alargadas, con flores papilionáceas de color blanco, blanco-amarillento o rosado. Las vainas, de forma oval o cuadrangular, están lateralmente comprimidas y presentan pocas semillas.

Requiere de climas templados, pero es tolerante a las heladas. Se desarrolla sobre suelos moderadamente fértiles, bien drenados, de textura ligera o media y levemente ácidos o ligeramente calcáreos con un pH que varía de 4,5 a 6,5. La mayor limitación de este cultivo es su característica de calcífugo, no pudiendo desarrollarse en suelos con pH superior a 6,8. No funciona bien en suelos arcillosos pesados, saturados de agua y alcalinos. En condiciones limitantes de fósforo en el suelo, el altramuz forma estructuras especializadas en forma de racimo en sus raíces movilizándolo que liberan fósforo de formas insolubles. Gracias a su profunda raíz, que puede alcanzar hasta los 70 cm de profundidad, esta planta mejora el drenaje y la textura del suelo.

Los altramuces son leguminosas con un elevado contenido en proteínas ricas en aminoácidos azufrados que pueden fijar hasta 300-400 kg N ha⁻¹ y son considerados beneficiosos para el cultivo subsiguiente. La planta puede ser pastada o cosechada para forraje o ensilado y su producción puede alcanzar 6-7 t MS ha⁻¹. Se suele utilizar como abono verde y en fitorremediación y, al igual que el trébol violeta, también puede considerarse como un pasto melífero (Duke, 1981; Jansen, 2006; El Bassam, 2010; Lambers *et al.*, 2012; Clark, 2014; Fumagalli *et al.*, 2014).



Fotografía 4.4. Parcela sembrada con altramuz blanco (*Lupinus albus* L.) en monocultivo (izquierda) y detalle de las hojas y de las inflorescencias de la planta (derecha).

- **Nabo francés (*Camelina sativa* L. Crantz):**

El nabo francés (Fotografía 4.5) es planta anual, de la familia de las brassicáceas o crucíferas, de porte erecto y que puede alcanzar alturas de 30 a 90 cm. Posee un único tallo, generalmente ramificado desde la base, que se convierte en leñoso cuando madura. Tiene las hojas lanceoladas, de 15-50 mm de largo, 5-10 mm de ancho, cuneadas, enteras o irregularmente dentadas. Las inflorescencias son racimos con flores de color blanco, amarillo pálido o amarillo verdoso. Los frutos son vainas en forma de pera que albergan entre 8 y 15 semillas cuyo aceite presenta un alto contenido en ácidos grasos insaturados, alrededor del 90%. Los niveles de glucosinolato en su harina son más bajos que en otras especies de crucíferas (Lange *et al.*, 1995). Estas características convierten al nabo francés en un cultivo con un potencial agronómico muy interesante en el ámbito de la nutrición animal, por lo que tanto su harina como el aceite están siendo evaluados para usarlos en la alimentación de peces, ganado vacuno para carne, producción de leche y avicultura. Sin embargo, hay poca información de su

uso como forraje, aunque se ha comprobado que la palatabilidad del cultivo (en verde) es buena en animales en pastoreo.

Este cultivo se adapta a un amplio rango de condiciones climatológicas y posee gran resistencia a la sequía y a las heladas. Es poco exigente en cuanto requerimientos de cultivo. La raíz es de tipo pivotante y se desarrolla en todo tipo de suelos y texturas, pudiendo llegar a soportar terrenos pobres en nutrientes, pero no tolera los encharcamientos. Ejerce un control muy efectivo sobre las malas hierbas, lo que la convierte en una especie muy interesante en sistemas de agricultura sostenible (Putnam *et al.*, 1993; Zubr, 1997; Schuster y Friedt, 1998; Bonjean y Le Goffic 1999; Francis y Warwick, 2009; Gugel y Falk, 2011).



Fotografía 4.5. Parcela sembrada con nabo francés (*Camelina sativa* L.) en monocultivo (derecha) y detalle de su inflorescencia (derecha).

- **Colza forrajera (*Brassica napus* L.):**

La colza forrajera (Fotografía 4.6) es una especie oleaginosa perteneciente a la familia de las brasicáceas. Es una planta anual o bianual de 30-150 cm, glauca, glabra o con pelos simples y gruesos. Las hojas son liradas, con varios segmentos laterales y uno terminal mucho mayor y dentado. Las flores son pequeñas, amarillas y se agrupan en racimos terminales. La semilla de colza tiene una proporción importante de aceite (39%) con un alto nivel de ácidos grasos poliinsaturados. Se desarrolla a partir de los 400 mm de lluvia anual. Soporta bien las sequías invernales y, en estado de roseta, es capaz de soportar temperaturas muy frías. Tiene una raíz pivotante, con numerosas raíces secundarias y con tendencia natural a profundizar, que es capaz de movilizar P y K devolviéndolo a la superficie, lo que mejora la estructura y drenaje del suelo. Puede secuestrar nitratos (52 kg N ha⁻¹; Jackson *et al.*, 1993) evitando que estos se pierdan por lixiviación en suelos permeables. Prefiere suelos profundos con texturas arcillo-limosas con

buena aireación y drenaje. El intervalo de pH deseable es de 5,5-7 aunque puede cultivarse en cualquier tipo de suelo, soportando incluso una cierta acidez. Es muy sensible al exceso de humedad por lo que no tolera el encharcamiento prolongado. La colza forrajera alcanza producciones elevadas (11 t MS ha^{-1}) y se aprovecha en la fase de floración mediante un único corte para silo. Se ha empleado tradicionalmente como abono verde por su efecto alelopático por la exudación de sustancias radiculares y por ser capaz de bombear nutrientes de las capas profundas a las superficiales (Vance *et al.*, 2003; Canals *et al.*, 2009; CIFA, 2010).



Fotografía 4.6. Parcela sembrada con colza forrajera (*Brassica napus* L.) en monocultivo (izquierda) y detalle de la floración de la planta (derecha).

- **Maíz forrajero (*Zea mays* L.):**

El maíz (Fotografía 4.7) es el cereal más cultivado a nivel mundial y en la Cornisa Cantábrica es una de las principales fuentes de energía de la alimentación del ganado, ya sea como ensilado, o en grano usado para la elaboración de piensos.

Es un cultivo forrajero de primavera-verano perteneciente a la familia de las gramíneas. Se diferencia del maíz de grano sólo por el momento de la cosecha (Ferrer, 2016). Es una planta anual que puede alcanzar los 4 m de altura. Tiene un sistema radicular bien ramificado y profundo y sus tallos son gruesos y macizos. Las hojas son largas, de gran tamaño, lanceoladas, alternas y paralelinervias. Se encuentran abrazadas al tallo y por el haz presentan vellosidades. Los extremos de las hojas son muy afilados y cortantes. Como especie monoica presenta inflorescencias masculinas y femeninas separadas dentro de la misma planta. Las flores masculinas se ubican en el ápice del tallo en forma de panícula (penacho), de coloración amarilla y con una cantidad muy elevada de polen. Las flores femeninas aparecen en las axilas de algunas hojas y dan lugar a una panoja o mazorca.

El maíz, aunque se adapta a condiciones edafoclimáticas diferentes, necesita calor para desarrollarse, no tolera el frío ni la sequía y resiste mal el encharcamiento. Es un cultivo muy productivo, alcanzando valores de 12-20 t de MS ha⁻¹ año⁻¹ en tan solo cuatro-cinco meses sin regadío. Se aconseja una densidad de siembra de 90.000-100.000 plantas ha⁻¹ siendo habitual plantar un 10% más de lo necesario para compensar las posibles mermas. Presenta un alto contenido en azúcares solubles que garantizan un elevado aporte de energía y una adecuada ensilabilidad. Los contenidos proteicos son bajos (6-9% PB) y la digestibilidad de la planta entera es elevada. El aprovechamiento como forraje para ensilar se efectúa en un único corte en estado de grano pastoso-vítreo (contenido de materia seca en la planta entera del 30% aproximadamente). Existe en el mercado una gran oferta de variedades que se agrupan según la duración de su ciclo vegetativo (Canals *et al.*, 2009; Martínez-Fernández *et al.*, 2014; Ferrer, 2016; Alonso, 2017).



Fotografía 4.7. Panorámica de un ensayo de variedades de maíz forrajero (*Zea mays* L.) realizado en el SERIDA de Villaviciosa (izquierda) y detalle de la mazorca (derecha).

4.2.3.2. Especies y cultivares (cv.) empleados en el ensayo:

- Raigrás italiano (RI; *Lolium multiflorum* Lam. cv. “Barextra”; comercializado por Barenbrug).
- Haba forrajera (HB; *Vicia faba* L. cv. “Prothabon 101”; comercializado por Semillas Batlle).
- Trébol violeta (TV; *Trifolium pratense* L. cv. “Quiñequeli”; comercializado por semillas Fitó).
- Altramuz blanco (ALT; *Lupinus albus* L.; suministrado por el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura, CICYTEX).
- Nabo francés (NF; *Camelina sativa* L. Crantz; suministrado por Camelina Company España S.L.).
- Colza forrajera (COL; *Brassica napus* L. cv. “Fricola”; comercializada por Semillas Batlle).
- Maíz forrajero (M; *Zea mays* L. cv. “SY Kairo” (ciclo FAO 200); comercializada por Syngenta).

El raigrás seleccionado para el ensayo fue un cultivar no alternativo para evitar el corte invernal y favorecer la asociación con las otras especies. Como alternativa se seleccionaron diferentes leguminosas para ser cultivadas en monocultivo o en intercultivo con raigrás y dos crucíferas. Las leguminosas y las crucíferas fueron seleccionadas por tener desarrollos fenológicos similares, lo que permitió definir un único momento de cosecha en primavera sin comprometer el cultivo posterior. Para completar la rotación se seleccionó una variedad de maíz forrajero de ciclo corto, de acuerdo a los resultados de la evaluación de variedades comerciales llevada a cabo por el SERIDA para la zona interior baja de Asturias (Argamentería *et al.*, 2012; 2013; 2014).

4.2.4. Diseño experimental

El diseño experimental se planteó para estudiar diferentes rotaciones forrajeras “alternativa de invierno-maíz” en condiciones de secano, comparando dos sistemas de manejo diferentes: “convencional”, para la rotación raigrás italiano-maíz, en la que se aplicó fertilización inorgánica y “sostenible”, para todas las rotaciones que incluían leguminosas o crucíferas en monocultivo o en intercultivo como cultivo de invierno, en las que se utilizó fertilización orgánica.

Se utilizó un diseño en parcela dividida (“Split-Plot”) con tres repeticiones, durante tres años agronómicos consecutivos (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015). La parcela principal la formaron un testigo sin leguminosa (OL) y las tres leguminosas: trébol violeta (TV), haba forrajera (HB) y altramuz (ALT) y la subparcela la constituyeron un testigo sin cultivo (ONL), el raigrás italiano (RI) y dos especies de crucíferas (colza -COL- y nabo francés -NF-). Cada repetición (A, B, C) constituyó un bloque donde el orden de las parcelas principales (OL, TV, HB, ALT) y de las subparcelas (ONL, RI, COL, NF) se sorteó al azar. Las especies en monocultivo y los intercultivos leguminosa-gramínea y leguminosa-crucífera se evaluaron en cada repetición en subparcelas de 5,5 m x 5,5 m. Las subparcelas correspondientes a OL x ONL de cada repetición representaron la vegetación espontánea. Se repitió la misma asignación de los cultivos en cada combinación bloque-parcela principal-subparcela durante los tres años de estudio (Figura 4.2).

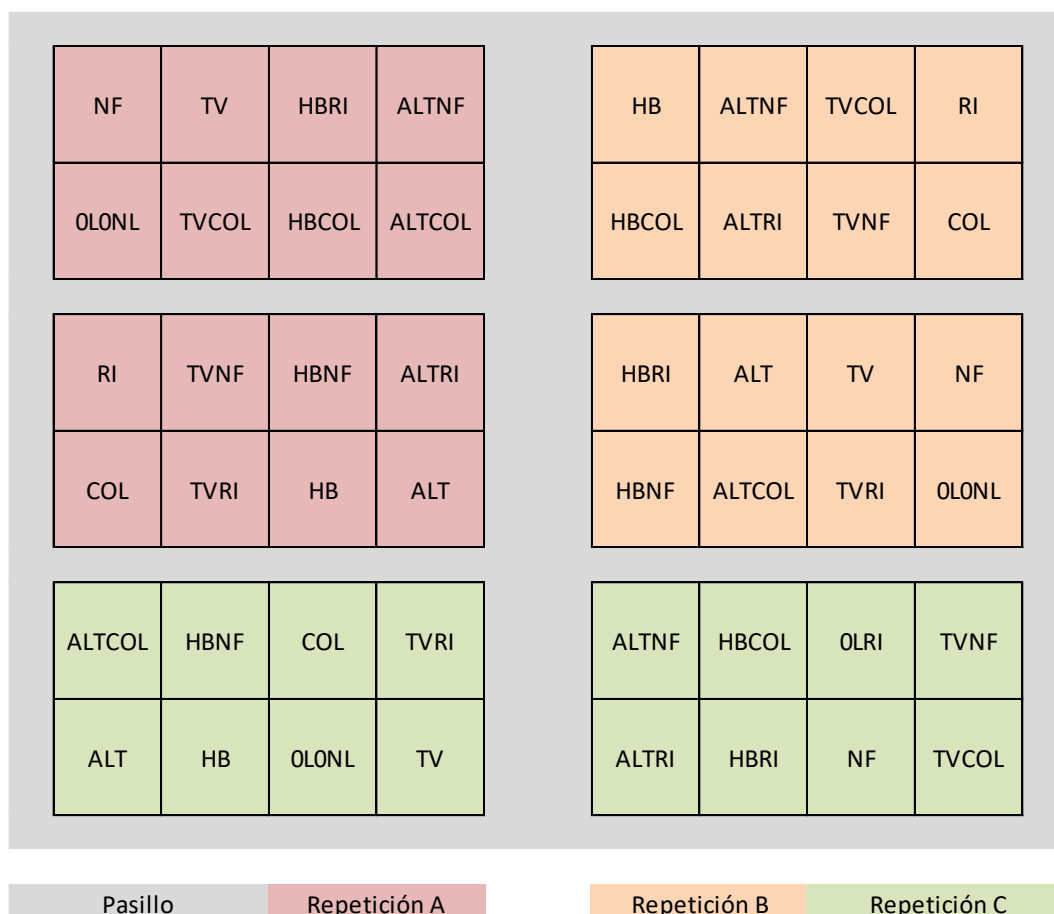


Figura 4.2. Esquema de la distribución de los forrajes en la finca experimental según un diseño en parcela dividida con tres repeticiones y cuya asignación se repitió durante los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015). OLONL: vegetación espontánea; RI: raigrás italiano; HB: haba forrajera; TV: trébol violeta; ALT: altramuz blanco; NF: nabo francés; COL: colza forrajera; HBRI: intercultivo haba-raigrás; TVRI: intercultivo trébol-raigrás; ALTRI: intercultivo altramuz-raigrás; HBNF: intercultivo haba-nabo; TVNF: intercultivo trébol-nabo; ALTNF: intercultivo altramuz-nabo; HBCOL: intercultivo haba-colza; TVCOL: intercultivo trébol-colza y ALTCOL: intercultivo altramuz-colza.

4.2.5. Manejo aplicado a los cultivos de invierno

4.2.5.1. Laboreo, abonado y dosis de siembra

Los ensayos comenzaron en otoño de 2012, en una parcela experimental que se encontraba en situación de barbecho. La preparación del terreno previa a la siembra consistió en pase de subsolador cruzado, pase de grada, abonado de fondo y pase cruzado de fresadora.

El abonado de fondo previo a la siembra se realizó en función de los resultados obtenidos en el análisis del suelo (Tabla 4.6), cuya metodología se describe en el apartado 4.2.8.1, y siguiendo las recomendaciones de Martínez-Fernández y Argamentería-Gutiérrez (2013).

En las alternativas forrajeras (leguminosas, crucíferas e intercultivos) y en la parcela OL0NL se aplicó estiércol compostado procedente de la estabulación del SERIDA. La composición del estiércol fue de 9-8-9 kg N-P₂O₅-K₂O t⁻¹, 4-4-12 kg N-P₂O₅-K₂O t⁻¹, y 8-5-10 kg N-P₂O₅-K₂O t⁻¹ para los años 2012, 2013 y 2014 respectivamente, con una dosis de aplicación de 6 t ha⁻¹ de estiércol en 2012, 12 t ha⁻¹ en 2013 y 8 t ha⁻¹ en 2014. Debido al déficit de K encontrado en el suelo al comienzo del experimento, se aplicaron 115 kg ha⁻¹ de K₂O en forma de cloruro de potasa al 60% en todas las parcelas con el fin de no limitar el crecimiento de los cultivos. En las subparcelas de RI en monocultivo, se aplicaron las dosis de NPK equivalentes a las aplicadas en el manejo alternativo en pre-siembra, pero utilizando un fertilizante inorgánico para simular un manejo convencional. Además, en estas parcelas, se aplicaron 60 kg ha⁻¹ de N complementario en forma de nitrato amónico cálcico al 27% (NAC 27) después del primer corte para ensilado en primavera.

Las siembras se realizaron a voleo el 16/11/2012, el 31/10/2013 y el 27/10/2014. Las dosis de semilla se fijaron en función de la especie, tamaño y porte de las plantas, estableciéndose para los monocultivos las siguientes cantidades: TV = 20 kg ha⁻¹; HB = 150 kg ha⁻¹; ALT = 100 kg ha⁻¹; RI = 40 kg ha⁻¹; COL = 8 kg ha⁻¹ y NF = 8 kg ha⁻¹. Los intercultivos se realizaron en proporción 1:1, reduciendo proporcionalmente la cantidad de semilla aportada de cada especie.

4.2.5.2. Aprovechamiento de los cultivos

Los cultivos se cosecharon en la primavera siguiente a la siembra, momento en el que se hizo un control de producción. En la parcela de RI se realizó un corte de limpieza a la salida del invierno (febrero) y dos cortes para ensilar en primavera, el primero cuando se encontraba en estado fenológico de inicio de espigado y el segundo 5-7 semanas después. El resto de alternativas se aprovecharon en un único corte, el trébol y las crucíferas en principio de floración y las habas y los altramuces en estado de vainas con grano (plena floración). En los cultivos asociados, cuando no coincidieron los momentos óptimos de corte para ambas especies, el control de producción se realizó en función del estado fenológico correspondiente a la especie de mayor desarrollo.

4.2.5.3. Control de producción

El control de producción de las parcelas se realizó empleando una motosegadora de peine de 0,90 m de ancho de corte. En primer lugar, se realizó un corte de limpieza en la subparcela para eliminar el efecto borde y, posteriormente, se efectuaron dos cortes transversales a lo largo de la subparcela. El forraje obtenido fue pesado *in situ* con un dinamómetro electrónico para el control de cargas ligeras. Por último, se midió longitud de ambos cortes transversales con un hipsómetro digital (Vertex IV) para calcular el área y estimar la producción (en kg de materia verde por ha) referida a dicha superficie (Fotografía 4.8).



Fotografía 4.8. Control de producción de los cultivos de invierno: corte de limpieza del borde (arriba-izquierda), corte transversal (arriba-derecha), pesaje del forraje (abajo-izquierda) y medición del corte transversal con un hipsómetro digital (abajo-derecha).

4.2.6. Manejo aplicado al cultivo de verano

4.2.6.1. Laboreo, abonado y dosis de siembra

Tras la cosecha en primavera de los cultivos de invierno, se preparó el terreno para la siembra del maíz que consistió en varios pases cruzados de grada y fresadora.

El abonado de las parcelas en las que el maíz iba en rotación con RI consistió en el aporte de 125 kg ha⁻¹ de N, 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 250 kg ha⁻¹ de K₂O en pre-siembra, simulando manejo convencional. El resto de subparcelas se fertilizaron con estiércol procedente de la propia explotación previamente analizado para aportar las mismas cantidades de nutrientes simulando manejo sostenible.

La siembra del maíz se realizó el 26/06/2013, 04/06/2014 y 23/06/2015, con una separación entre líneas de 0,70 m y una distancia entre plantas de 0,15 m. La densidad de siembra final, después de un aclareo, fue de 90.000 semillas por hectárea.

En todos los casos, para el control de la flora arvense se aplicó un herbicida selectivo en pre-emergencia (PrimextraGold®, Syngenta) a una dosis de 4 L ha⁻¹, y para el control de plagas se utilizó el insecticida Dursban™ 48 (Syngenta) a una dosis de 600 g ha⁻¹.

4.2.6.2. Aprovechamiento del cultivo

La cosecha del maíz se llevó a cabo, cuando el grano se encontraba en estado pastoso-vítreo, estado fenológico que se considera óptimo para ensilar. Las fechas de recolección fueron 09/10/2013, 29/09/2014 y 15/10/2015 respectivamente.

4.2.6.3. Control de producción

Antes de realizar la cosecha del maíz, se realizó el control de producción de cada subparcela cosechando dos líneas centrales de las que se descartaron las dos primeras plantas de ambos extremos de las filas. Se midió la longitud de las líneas cosechadas (Vertex IV) para definir el área de muestreo. Las plantas se cortaron con una hoz a 20 cm sobre el nivel del suelo, contabilizando su peso total en verde con una báscula portátil para estimar la producción (en kg de materia verde por ha). Las muestras fueron trituradas utilizando una biotrituradora (Viking®, GE 355) y procesadas para su posterior análisis (Fotografía 4.9).



Fotografía 4.9. Control de producción del cultivo de verano (maíz forrajero): pesaje del forraje (izquierda) y medición de la longitud de las líneas de muestreo con un hipsómetro digital (derecha).

4.2.7. Toma de muestras

4.2.7.1. Muestras de suelo

Al comienzo de los ensayos, se realizó un análisis de suelo para conocer su estado de partida y estimar los requerimientos de abonado necesarios. Posteriormente, tras cada cosecha de los cultivos de invierno, se repitió dicho análisis en cada una de las combinaciones parcela principal*sub-parcela para calcular los requerimientos en fertilización del siguiente año agronómico y para evaluar posibles cambios en el perfil del suelo dependiendo del tipo de cultivo respecto a la situación inicial.

Cada muestra de suelo se constituyó a partir 10 sub-muestras tomadas al azar de la capa superior del suelo (10-20 cm de profundidad) con una sonda holandesa. Las muestras fueron colocadas en bolsas plásticas con cierre hermético y llevadas al laboratorio del Área de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Oviedo para su análisis.

4.2.7.2. Muestras de material vegetal

En los cultivos de invierno, se tomaron muestras del material vegetal cosechado en verde para determinar su contenido en principios nutritivos, contenido energético y perfil de ácidos grasos. Tras 24 h de prehenificado sobre sobre el terreno, se tomaron muestras para determinar las características de ensilabilidad de los forrajes. El material vegetal restante se utilizó para la elaboración de ensilados a escala de laboratorio (microsilos) utilizando el modelo descrito por Martínez-Fernández y de la Roza (1997) y validado por Martínez-Fernández (2003). Tras un período de fermentación de aproximadamente 60 días, se abrieron los microsilos para tomar muestras y determinar el contenido en principios nutritivos, parámetros fermentativos, contenido energético, perfil de ácidos grasos y estabilidad aeróbica del ensilado resultante.

En el cultivo de verano (maíz) se tomaron muestras del material vegetal cosechado en verde para determinar su contenido en principios nutritivos y su contenido energético.

4.2.8. Determinaciones analíticas

4.2.8.1. Propiedades fisicoquímicas del suelo

Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron (2 mm de malla) para quitar los elementos gruesos no asociados a la fertilidad.

Se determinó la textura por el método de la pipeta Robinson usando $(\text{NaPO}_3)_6$ con Na_2CO_3 como dispersante tras eliminar el contenido de materia orgánica del suelo (MOS) con H_2O_2 al 6% (Gee y Bauder, 1996). La MOS se determinó por ignición a 450°C durante 12 h en una mufla según el protocolo descrito por Schulte y Hopkins (1996). La capacidad de campo (CC) se midió utilizando el método de embudos cilíndricos tapados por la base con algodón, llenándolos con muestras de suelo y añadiendo agua suficiente para humedecer, transcurridas 48 h, tres cuartas partes de la muestra. Finalmente, se tomó una muestra de la zona central de la parte húmeda y se determinó la humedad según Afif (2005). La densidad aparente (d_a) se determinó considerando el volumen ocupado por 100 g de la fracción de suelo secado al aire según el método del cilindro graduado (Andrades *et al.*, 2015). El C orgánico se estimó a partir de los resultados obtenidos de la MOS según la relación propuesta por Oliveira *et al.* (2006) para suelos con menos del 5,8% de C orgánico:

$$C (\%) = \text{MOS} (\%) / 1,724$$

El pH se determinó en una suspensión suelo:agua 1:2,5 empleando el método potenciométrico descrito en MAPA (1994). En el mismo extracto utilizado para la determinación del pH, diluido 1:5, se midió la conductividad eléctrica (CE) siguiendo el protocolo descrito por Porta *et al.* (1986). Para ambas mediciones se utilizó el medidor de pH y conductividad SevenMulti™ (Mettler Toledo®, Schwerzenbach, Suiza).

Para determinar la concentración de las bases extraíbles (Ca, Mg, Na y K) se utilizó CINH_4 1M como solución desplazante y para la determinación del Al intercambiable se utilizó KCl 1M. Una vez extraídas, se analizaron mediante espectrofotometría de absorción atómica (Perkin Elmer® AAnalystTM 200, Shelton, CT, EE.UU.) según la metodología descrita por Pansu y Gautheyrou (2006). Finalmente, se calcularon la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y el Al en el complejo de cambio (Al_{CICE}) como:

$$\text{CICE} (\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}) = \sum \text{bases extraíbles} (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{Na}^{+} + \text{K}^{+}) + \text{acidez intercambiable} (\text{Al}^{+3})$$

$$Al_{CICE} (\%) = Al (\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}) / CICE (\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}) * 100$$

El N total se determinó por el método Kjeldahl (Klute, 1996) y el P disponible mediante el método de Mehlich 3 (Mehlich, 1984) mediante espectrofotometría (Perkin Elmer® Lambda™ 35 UV/VIS, Shelton, CT, EE.UU.).

4.2.8.2. Forrajes

Todos los forrajes fueron analizados en el laboratorio de Nutrición Animal del SERIDA, acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) conforme a los criterios recogidos en la norma UNE-EN-ISO/IEC 17025 (N° de expediente LE/930).

Las muestras del material vegetal recolectado y homogenizado fueron desecadas en estufa de aire forzado a 60°C durante 24 h (de la Roza Delgado *et al.*, 2002) y molidas a 0,75 mm (molino Fritsch Pulverisette 25) para su posterior análisis.

La determinación del contenido de materia seca (MS), cenizas (CEN), proteína bruta (PB), fibra bruta (FB), fibra neutro detergente (FND), fibra ácido detergente (FAD) y digestibilidad enzimática de la materia orgánica (DEMO) de los forrajes y el contenido de almidón (ALM) del maíz, se realizó mediante tecnología NIRS con un equipo NIRSystem 5000 (FOSS NIRSystem Silver Spring, MD, EE.UU.), utilizando las ecuaciones de predicción específicas desarrolladas en el laboratorio de Nutrición Animal del SERIDA. La materia orgánica (MO) se estimó como la diferencia a 100 del contenido de cenizas. Los resultados de composición química del RI se calcularon como la media ponderada de los dos cortes realizados en primavera.

En los casos en los que no se disponía de ecuaciones NIRS específicas para algún tipo de forraje como HB, COL, NF y ALT, las muestras se analizaron por vía húmeda para los mismos parámetros anteriormente citados. El contenido de MS y CEN se determinó en un analizador termogravimétrico por desecación a 103 ± 4°C en atmósfera de N₂ hasta peso constante, seguida de la incineración a 550 ± 15°C en atmósfera de O₂ hasta peso constante utilizando una termobalanza TGA-601 de LECO (LECO Corporation, St Joseph, Michigan, EE.UU.). La MO se estimó como 100 menos la proporción de cenizas. Se determinaron los contenidos de FB según AOAC (1984) y de FND y FAD según fraccionamiento de Van Soest (Van Soest *et al.*, 1991), utilizando un equipo Fibertec (1020 Hot Extractor Analyzer de Tecator FOSS Electronic A/S Hillerød, Dinamarca). El contenido de PB se calculó a partir del nitrógeno (N x 6,25) determinado

mediante el método Kjeldahl (Kjeltec 8400 de Tecator). La determinación de la digestibilidad *in vivo* de la materia orgánica (Dvivo) se estimó según Riveros y Argamenteoría (1987), a partir de la DEMO y de los contenidos en FND y PB. El contenido de energía metabolizable (EM) de todas las muestras se estimó según ARC (1980).

Dado que el destino final de estas alternativas forrajeras de invierno es la elaboración de ensilado, se determinaron los parámetros que definen la ensilabilidad: MS en el momento de ensilar, azúcares solubles (AZSOL) como carbohidratos reductores y carbohidratos solubles totales por reducción con ferricianuro (Hoffman, 1937) y la capacidad tampón (CT) según Playne y McDonald (1966). Con los resultados obtenidos se calculó el índice de ensilabilidad (IE) de los forrajes según la fórmula propuesta por Martínez-Fernández *et al.* (2013):

$$IE = 152,29 - 1,97*MS (\%)+0,85*AZSOL (\% \text{ sobre MS})-3,75*CT (\text{meq NaOH } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MS})$$

El perfil lipídico de los forrajes de invierno se determinó siguiendo la metodología de Palmquist y Jenkins (2003), con análisis mediante cromatografía de gases y detector de masas (GC-4000, Varian, Inc., Palo Alto, CA, EE.UU.) empleando una mezcla patrón de 52 ésteres metílicos (GLC Reference Standards 463, Nu-Chek Prep, Inc., Elysian, MN, EE.UU.) para la identificación de compuestos mediante tiempo de retención y espectro de masas.

En los ensilados de los forrajes de invierno se realizaron las mismas determinaciones analíticas que para el forraje verde (valor nutritivo, contenido energético y perfil lipídico) además de los parámetros fermentativos. En primer lugar, se midió el pH utilizando una sonda de penetración (InLab, Mettler Toledo) y, posteriormente, las muestras de ensilado fueron prensadas para extraer el jugo con el que poder realizar el resto de determinaciones. El nitrógeno amoniacal (N-NH₃) se cuantificó mediante destilación con MgO y el ácido láctico (LAC) y los ácidos grasos volátiles (propiónico -PRO-; acético -ACE- y butírico -BUT-) se determinaron mediante cromatografía líquida de alta resolución (Waters, Milford, MA).

La resistencia al deterioro aeróbico de los ensilados se efectuó en la cámara de estabilidad aeróbica del Área de Nutrición, Pastos y Forrajes del SERIDA. Su determinación se hizo conforme a la metodología descrita por de la Roza *et al.* (1999) controlando los incrementos de pH y temperatura sobre la muestra de ensilado durante un período de 10 días tras su apertura. Para evaluar la estabilidad aeróbica de los ensilados de las diferentes alternativas ensayadas se utilizó el criterio establecido por Moran *et al.* (1996), que consideran que un

ensilado es inestable cuando su temperatura se incrementa en 2°C respecto a la temperatura inicial.

4.2.9. Análisis estadístico

El análisis estadístico fue realizado mediante el software estadístico de libre acceso R (R Core Team, 2017).

Los resultados de producción, valor nutritivo, contenido energético, ensilabilidad, parámetros fermentativos y ácidos grasos de los forrajes de invierno y sus correspondientes ensilados fueron contrastados mediante análisis de varianza (ANOVA). Se utilizó un modelo mixto, conforme a un diseño en parcela dividida, donde se consideraron los factores “leguminosa” (parcela principal) y “no leguminosa” (subparcela) como efectos fijos y el bloque, la parcela principal anidada al bloque y el año de cultivo como efectos aleatorios. Para comparar las alternativas forrajeras frente al raigrás italiano se llevó a cabo un test de Tukey con las estimaciones del modelo. Los datos de producción y calidad del maíz recibieron el mismo tratamiento estadístico que los forrajes de invierno.

Los resultados obtenidos en el análisis fisicoquímico del suelo fueron contrastados mediante un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores. El cultivo fue considerado factor principal y el año efecto aleatorio. Para la comparación de medias se realizó el test de comparaciones múltiples de Duncan estableciendo la significancia en $p < 0,05$.

4.3. RESULTADOS

4.3.1. Condiciones termopluiométricas

Las condiciones climáticas del área de estudio se muestran en la Figura 4.3. Se observó que, mientras el patrón de variación anual de temperaturas fue similar durante los tres años de estudio, la cantidad de lluvia acumulada y su distribución fue diferente entre años.

La temperatura media registrada, para los tres años de ensayo, en los meses en los que estuvieron implantados los cultivos de invierno fue de 10,4°C, con una media de las temperaturas mínimas de 5,3°C y una media de las temperaturas máximas de 15,5°C. Durante los meses del cultivo de verano, la temperatura media fue de 18,2°C, con una media de las mínimas de 12,5°C y una media de las máximas de 23,8°C.

Respecto al régimen pluviométrico, frente a una precipitación media de 962 mm en 147 días de lluvia que nos indica el histórico (2000-2012), el primer año (2012-2013) fue el más lluvioso, con una precipitación anual de 1253 mm en 159 días de lluvia; principalmente distribuida durante los meses de enero, febrero y marzo. El segundo año (2013-2014), la precipitación anual disminuyó respecto al año anterior con 995 mm en 124 días de lluvia y con una distribución homogénea durante todos los meses de invierno. En el último año de estudio (2014-2015) se registró una precipitación anual de 1123 mm en un total de 133 días de lluvia, destacando el mes de febrero con 252 mm recogidos en 16 días de lluvia.

Estas condiciones influyeron en el desarrollo de los cultivos de diferente manera. El raigrás italiano, el haba forrajera y el trébol violeta completaron su desarrollo los tres años de estudio independientemente de las condiciones climáticas. El altramuz blanco completó su desarrollo dos de los tres años de estudio (2013-2014 y 2014-2015), mientras que el nabo francés únicamente prosperó el segundo año de estudio (2013-2014), cuando el régimen de precipitaciones fue menor y su distribución fue más homogénea. La colza forrajera no se desarrolló ninguno de los tres años de estudio independientemente de las condiciones termopluiométricas, tanto en monocultivo como en intercultivo con leguminosas o raigrás italiano. Por ello, los cultivos con colza no son considerados en los resultados.

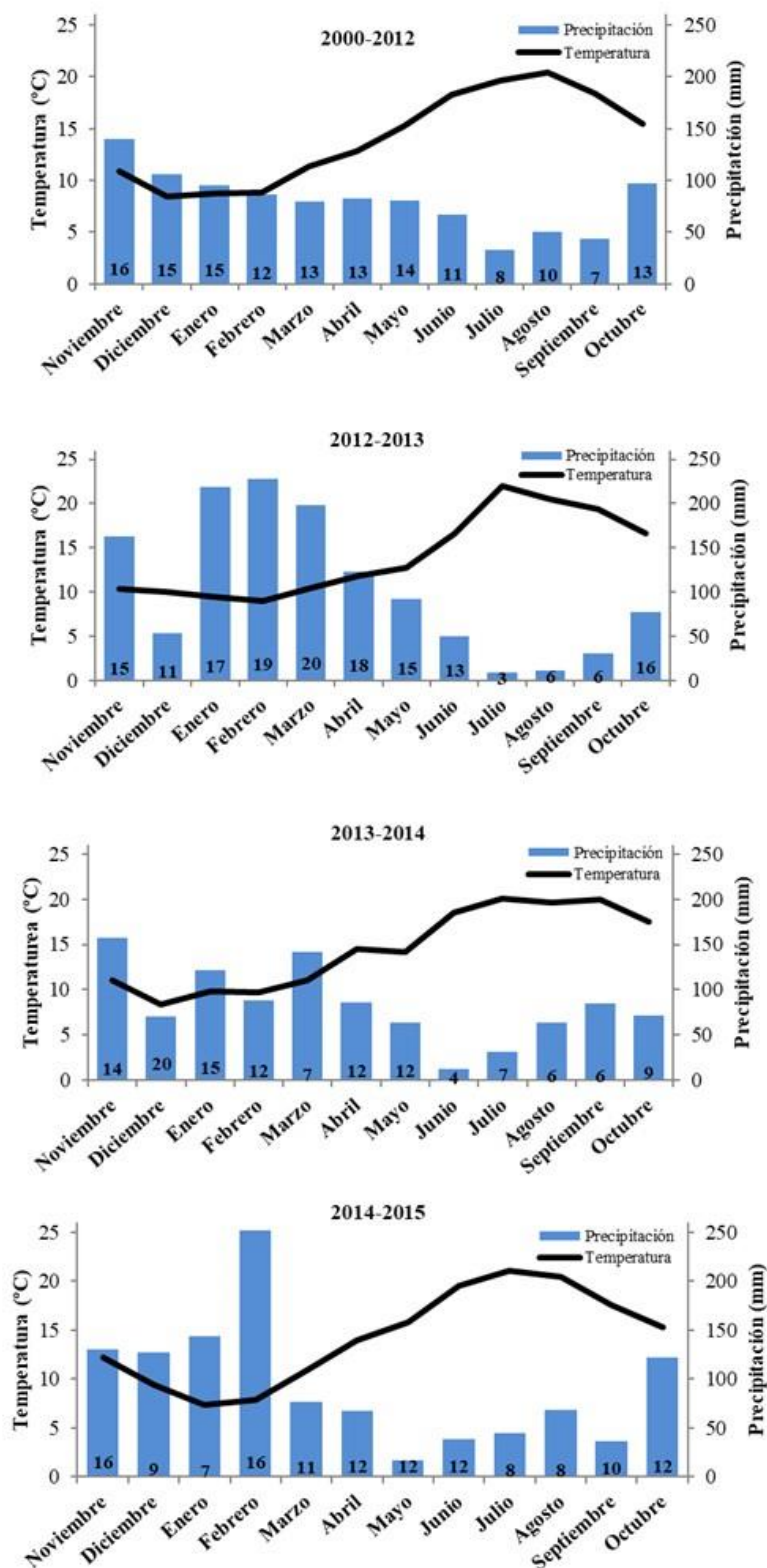


Figura 4.3. Diagramas ombrotérmicos del área experimental durante los 12 años previos a este estudio (2000-2012) y de los tres años agronómicos (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015) del ensayo. El número de días de lluvia por mes se indica en la parte inferior de cada columna.

4.3.2. Forrajes verdes

En la Fotografía 4.10 se muestra el aspecto de las distintas alternativas ensayadas antes de ser cosechadas en primavera.



Fotografía 4.10. Vista panorámica de la finca experimental utilizada en la presente tesis en la que se muestra el aspecto de los cultivos de invierno en el momento previo a la cosecha de primavera en el año agronómico 2014-2015.

En la Figura 4.4 se detalla la media de rendimiento en materia seca (kg MS ha^{-1}) de los cultivos de invierno comparados frente al RI durante los tres años de estudio. HB, HBRI y TVRI alcanzaron producciones que no difieren significativamente de las obtenidas con los dos cortes acumulados de RI ($7237 \text{ kg MS ha}^{-1}$) con unas producciones de 6496 , 7367 y $5738 \text{ kg MS ha}^{-1}$ respectivamente. El resto de alternativas presentaron rendimientos muy inferiores al RI ($p < 0,001$) siendo la menos productiva el NF con tan solo $495 \text{ kg MS ha}^{-1}$, ya que solo se desarrolló un año de los tres que duró el estudio.

En las parcelas sin cultivo invernal (OLONL) se obtuvo una producción media de $2291 \text{ kg MS ha}^{-1}$ que corresponde a la vegetación espontánea representada por especies adventicias habituales en este tipo de suelos como *Ranunculus* spp., *Juncus* spp., *Cerastium* spp., *Trifolium repens* L., *Poa* spp. y *Agrostis* spp.

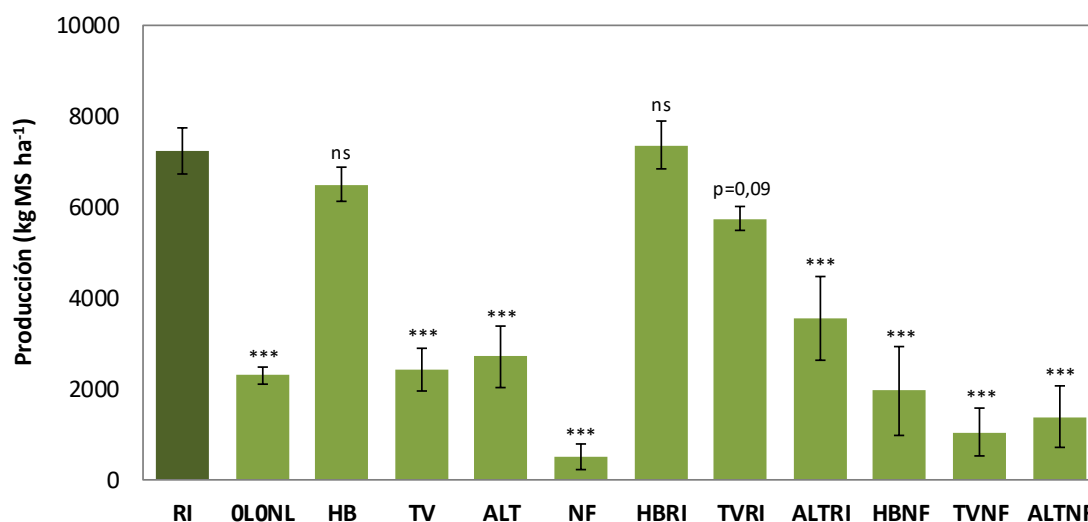


Figura 4.4. Rendimientos medios (kg MS ha⁻¹) de los forrajes alternativos de invierno comparados frente al raigrás italiano (RI). OLONL: vegetación espontánea; HB: haba forrajera; TV: trébol violeta; ALT: altramuz blanco; NF: nabo francés; HBRI: intercultivo haba-raigrás; TVRI: intercultivo trébol-raigrás; ALTRI: intercultivo altramuz-raigrás; HBNF: intercultivo haba-nabo; TVNF: intercultivo trébol-nabo y ALTNF: intercultivo altramuz-nabo. Los valores corresponden a la media de los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015). No se incluye la colza (ni en monocultivo ni en intercultivo con otras especies) al no haberse establecido en ningún año de estudio. Los resultados del RI se calcularon como media ponderada de los dos cortes realizados en primavera. ***: p<0,001; ns: no significativo (p>0,05).

En la Tabla 4.1 se detallan los resultados de valor nutritivo, aporte energético y rendimientos por hectárea de los forrajes verdes y los parámetros de ensilabilidad de los forrajes prehenificados.

EL RI presentó una concentración de PB de 9,04%, encontrándose el mayor contenido proteico en las leguminosas en monocultivo, con 17,69; 16,63 y 15,74% PB para TV, HB y ALT respectivamente (p<0,001). El haba, tanto en monocultivo como en sus intercultivos presentó unos elevados contenidos en FAD con valores de 42,15; 38,26 y 32,71% MS para HBNF, HB y HBRI respectivamente frente al 21,58% en MS en RI (p<0,001). Como consecuencia de estos contenidos en fibra, la digestibilidad de estos cultivos se mantuvo por debajo del 65%.

Los mejores rendimientos en kg PB ha⁻¹ corresponden a HB y HBRI, con 1084 kg PB ha⁻¹ y 927 kg PB ha⁻¹ respectivamente, que superan significativamente a los obtenidos con la producción acumulada de los dos cortes de RI (649 kg PB ha⁻¹). En cuanto al rendimiento en kg MOD ha⁻¹, solamente HBRI y HBNF igualaron (p>0,05) al RI con valores de 4268 kg MOD ha⁻¹ y 3239 kg MOD ha⁻¹ vs. 5027 kg MOD ha⁻¹ respectivamente, mientras que el resto de los cultivos presentaron rendimientos en MOD estadísticamente inferiores. Lo mismo sucede con el

rendimiento en GJ EM ha⁻¹, donde HBRI y HBNF volvieron a ser los únicos cultivos que igualaron al RI con 68 y 52 GJ EM ha⁻¹ vs. 80 GJ EM ha⁻¹ respectivamente. El resto de alternativas dieron unos rendimientos GJ EM ha⁻¹ significativamente inferiores al RI.

El contenido en AZSOL de las leguminosas en monocultivo fue inferior al del RI ($p < 0,001$) al igual que los intercultivos de HBRI, HBNF, TVNF y ALTNF. De entre todas las alternativas de invierno ensayadas, el TVRI y ALTNF presentaron una baja CT ($CT < 25$ meq NaOH 100 g⁻¹ MS). Según el IE desarrollado por Martínez-Fernández *et al.* (2013), que tiene en cuenta los tres parámetros que definen la ensilabilidad (MS, AZSOL y CT) de forma conjunta, ALTNF presentó una alta ensilabilidad ($IE > 28$); HB, ALT, TVRI y ALTRI una ensilabilidad media-alta ($9 < IE \leq 28$) y RI, TV, NF, HBRI, HBNF y TVNF presentaron una ensilabilidad media ($-28 < IE \leq 9$).

En la Tabla 4.2 se muestra el perfil de AG del forraje verde de los cultivos de invierno. En el año agronómico 2012-2013 no se analizaron porque las condiciones termoplumiométricas no permitieron el desarrollo de los cultivos de colza forrajera, nabo francés y altramuz blanco. Por tanto, estos análisis se realizaron con las muestras obtenidas en el segundo año agronómico donde todos los cultivos, excepto la colza forrajera, se desarrollaron sin problema y se repitieron el último año, aunque la colza y el nabo tampoco tuvieron éxito en su implantación.

En todos los forrajes ensayados, los AG mayoritarios fueron el ácido linolénico (C18:3 *cis-9 cis-12 cis-15*), ácido linoleico (C18:2 *cis-9 cis-12*) y ácido oleico (C18:1 *cis-9*) entre los insaturados y ácido palmítico (C16:0) entre los saturados. Ninguna alternativa presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) respecto al RI en el contenido de ácido palmítico, con cantidades que fueron desde los 18,44 g 100 g⁻¹ en TVNF a 28,49 g 100 g⁻¹ en ALT. ALTNF, ALT, NF y TVNF presentaron mayor contenido ($p < 0,05$) de ácido oleico que el RI, con valores de 2,72; 3,40; 3,62 y 4,26 g 100 g⁻¹ AG respectivamente frente a los 0,97 g 100 g⁻¹ del RI. Casi todas las alternativas forrajeras, excepto TVRI, ALTRI y ALTNF, fueron más ricas en ácido linolénico ($p < 0,05$) que el RI destacando el TVNF con 24,20 g 100 g⁻¹ frente a los 12,51 g 100 g⁻¹ del RI. ALT, HB y NF presentaron menos cantidad de ácido linolénico ($p < 0,05$) que el RI con valores de 42,73; 45,10 y 47,51 g 100 g⁻¹ frente a los 62,18 g 100 g⁻¹ del RI. De entre todas las alternativas, únicamente ALT presentó mayor concentración de ácidos grasos saturados ($p < 0,05$) que RI (32,81 vs. 23,83 g 100 g⁻¹).

Tabla 4.1. Valor nutritivo, aporte energético y rendimientos por hectárea de los forrajes verdes de invierno y parámetros de ensilabilidad tras 24 horas de prehenificado.

	RI ¹	OLONL	HB	TV	ALT	NF	HBRI	TVRI	ALTRI	HBNF	TVNF	ALTNF	rsd
Valor nutritivo y aporte energético													
Materia seca (MS)	15,73	18,45	13,48	14,21	14,46	17,57	14,63	19,98***	16,08	11,56	17,23	15,06	1,988
Materia orgánica (MO)	90,37	88,89	91,79	88,08	88,57	91,84	89,18	91,13	90,08	89,52	89,73	88,56	1,507
Proteína bruta (PB)	9,04	9,76	16,63***	17,69***	15,74***	13,76	13,00**	6,51	8,85	15,28	11,09	14,55	2,118
Fibra ácido detergente (FAD)	21,58	28,81**	38,26***	26,58	30,72**	23,29	32,71***	24,84	26,18	42,15***	32,22*	30,42	3,942
Fibra neutro detergente (FND)	46,89	50,99	49,79	46,25	47,03	37,15*	53,83**	51,66	51,82	54,65**	50,36	46,76	3,428
Digestibilidad de la MO <i>in vivo</i> (Dvivo)	76,98	65,58***	56,58***	68,96***	70,02**	73,07	64,69***	64,38***	65,93***	61,85***	66,25***	69,72*	3,524
Energía metabolizable (EM)	11,14	9,33***	8,32***	9,72***	9,92**	10,74	9,23***	9,39***	9,50***	8,86***	9,51**	9,88	0,543
Rendimientos por hectárea													
kg PB ha ⁻¹	649	224***	1084***	412	647	206**	927*	372*	456	893	338	606	164,4
kg MOD ha ⁻¹	5027	1339***	3426***	1451***	2525***	996***	4268	3361***	3159***	3239	1841***	2557***	700,3
GJ EM ha ⁻¹	80	21***	55***	23***	40***	16***	68	54***	51***	52	29***	41***	11,2
Ensilabilidad													
Materia seca prehenificada (MSp)	22,43	24,00	16,64**	20,15	21,38	21,70	17,29*	30,94***	26,10	15,20*	36,80***	24,13	3,230
Azúcares solubles (AZSOL)	25,69	10,36***	10,21***	8,77***	7,12***	16,82	12,48***	27,95	22,53	6,97***	9,15***	9,33***	3,598
Capacidad tampón (CT)	36,66	23,85**	30,28	34,74	27,49**	31,58	32,94	24,28**	26,80***	35,50	27,53	17,58***	6,706
Índice de ensilabilidad (IE)	-7	24	15	-10	13	5	5	24	20	-5	-16	47	

RI: raigrás italiano; OLONL: vegetación espontánea; HB: haba forrajera; ALT: altramuz blanco; TV: trébol violeta; NF: nabo francés; MS (%); MO (% MS); PB (% MS); FAD (% MS); FND (% MS); Dvivo (%); EM (MJ kg MS⁻¹); MOD: materia orgánica digestible; MSp (%); AZSOL (% MS); CT (meq NaOH 100 g⁻¹ MS); IE (según Martínez-Fernández *et al.*, 2013; alta: IE > 28; media-alta: 9 < IE ≤ 28; media: -28 < IE ≤ 9; media-baja: -47 ≤ IE < -28; baja: IE < -47). No se incluye la colza (ni en monocultivo ni en intercultivo con otras especies) al no haberse establecido en ningún año de estudio.

¹: Las alternativas se compararon estadísticamente frente al RI. Los resultados del RI se calcularon como media ponderada de los dos cortes realizados en primavera.

rsd: desviación estándar residual; ***: p ≤ 0,001; **: p ≤ 0,01; *: p ≤ 0,05; ns: no significativo (p > 0,05).

Los valores corresponden a la media de los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015), excepto para el altramuz (en monocultivo e intercultivo con otras especies), que se corresponde con los años 2013-2014 y 2014-2015 y para el nabo francés (en monocultivo e intercultivo con otras especies) que se corresponde únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014).

Tabla 4.2. Perfil de ácidos grasos (g 100 g⁻¹ AG) del forraje verde de las alternativas de invierno evaluadas (en monocultivo o en intercultivo).

	RI ¹	OLONL	HB	TV	ALT	NF	HBRI	TVRI	ALTRI	HBNF	TVNF	ALTNF	rsd
Caproico (C6:0)	0,10	<LC	<LC	<LC	0,31	0,64**	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0,214
Caprílico (C8:0)	0,09	0,16	0,15	0,04	0,17	0,06	0,10	0,13	0,16	0,04	0,01	0,02	0,063
Nonanoico (C9:0)	0,01	0,04	0,03	<LC	0,04	<LC	0,02	0,05	0,03	<LC	<LC	<LC	0,029
Cáprico (C10:0)	0,01	0,05	0,15***	0,03	0,05	0,14***	0,05	0,02	0,05	0,07	0,01	0,01	0,034
Láurico (C12:0)	0,31	0,15	0,49	0,10	0,33	0,08	0,31	0,41	0,40	0,25	0,08	0,15	0,152
Mirístico (C14:0)	0,52	0,66	0,61	0,42	0,86	0,75	0,52	0,71	0,78	0,50	0,45	0,53	0,218
Pentadecanoico (C15:0)	0,11	0,25*	0,32***	0,19	0,24	0,21	0,24	0,24	0,23	0,33**	0,14	0,13	0,082
Palmitico (C16:0)	22,03	23,97	24,88	18,48	28,49	25,98	23,61	26,46	26,49	22,24	18,44	19,39	4,378
Palmitoleico (C16:1 <i>cis</i> -9)	0,07	0,23**	0,22*	0,09	0,23*	0,20	0,15	0,16	0,12	0,10	0,19	0,16	0,085
Heptadecanoico (C17:0)	0,07	0,17**	0,19***	0,11	0,18***	0,12	0,10	0,13	0,13	0,17*	0,10	0,09	0,048
Esteárico (C18:0)	0,54	1,42***	1,76***	1,06	2,01***	1,30	1,21*	0,85	1,09	1,92***	1,23	1,41*	0,391
Oleico (C18:1 <i>cis</i> -9)	0,97	4,28***	1,22	1,85	3,40***	3,62***	1,26	1,43	1,51	1,85	4,26***	2,72*	0,771
Vaccénico (C18:1 <i>cis</i> -11)	0,20	0,59***	0,23	0,20	0,53***	0,46**	0,19	0,30	0,29	0,16	0,37	0,29	0,114
Linoleico (C18:2 <i>cis</i> -9 <i>cis</i> -12)	12,51	25,62***	24,19***	18,03*	20,00***	17,98	17,62*	15,44	13,48	21,16***	24,20***	16,50	3,121
Linolénico (C18:3 <i>cis</i> -9 <i>cis</i> -12 <i>cis</i> -15)	62,18	42,16***	45,10**	59,29	42,73***	47,51*	54,09	53,56	54,84	50,16	50,35	58,07	7,592
Araquídico (C20:0)	0,02	0,12	0,25***	0,05	0,09	0,16	0,16**	0,04	0,07	0,29***	0,07	0,10	0,069
Behénico (C22:0)	0,01	<LC	<LC	<LC	0,02	<LC	<LC	0,03	0,02	<LC	<LC	0,04	0,013
Σ Saturados	23,83	26,99	28,81	20,49	32,81*	29,44	26,31	29,06	29,45	25,81	20,53	21,86	5,114
Σ Insaturados	75,93	72,88	70,96	79,46	66,90*	69,77	73,30	70,89	70,24	73,42	79,39	77,75	5,137

RI: raigrás italiano; OLONL: vegetación espontánea; HB: haba forrajera; ALT: altramuz blanco; TV: trébol violeta; NF: nabo francés; <LC: por debajo del límite de cuantificación. No se incluye la colza (ni en monocultivo ni en intercultivo con otras especies) al no haberse establecido en ningún año de estudio.

¹: Las alternativas se compararon estadísticamente frente al RI. Los resultados del RI se calcularon como media ponderada de los dos cortes realizados en primavera.

rsd: desviación estándar residual; ***: p≤0,001; **: p≤0,01; *: p≤0,05; ns: no significativo (p>0,05).

Los valores corresponden a la media de dos años agrónomos de estudio (2013-2014 y 2014-2015) excepto para el para el nabo francés (en monocultivo e intercultivo con otras especies) que se corresponde únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014).

4.3.3. Ensilados

En la Tabla 4.3 se detallan los resultados de valor nutritivo, aporte energético y parámetros fermentativos del ensilado de las alternativas forrajeras de invierno frente al RI. Al igual que en el forraje verde, las leguminosas en monocultivo, superaron al RI en contenido proteico ($p < 0,001$). De los intercultivos ensayados, HBRI, HBNF y ALTNF también presentaron contenidos de PB significativamente superiores al RI. Al igual que en los forrajes verdes, el contenido de FAD de HB y ALT y los intercultivos con HB (HBRI y HBNF) fueron significativamente superiores a los del RI. Únicamente el ALT, el NF y su intercultivo (ALTNF) no difieren significativamente del RI en la digestibilidad de la MO. Estos cultivos tampoco difieren del RI en aporte energético.

Todos los forrajes presentan un pH correcto en función de su MS excepto TV que, además, difiere significativamente del pH del ensilado de RI. El TV, NF y su intercultivo (TVNF) presentaron un contenido significativamente inferior de ácido láctico respecto al RI, aunque superior al 3% MS recomendado en todos los casos. Todos los forrajes presentaron alto contenido en ácido acético ($>1\%$). Respecto al ácido butírico, RI y TV presentaron valores superiores al 0,5%.

En la Tabla 4.4 se muestra el perfil AG del ensilado de los forrajes evaluados. Al igual que en los forrajes verdes, los AG mayoritarios en los ensilados resultantes fueron el ácido linolénico (C18:3 *cis*-9 *cis*-12 *cis*-15), ácido linoleico (C18:2 *cis*-9 *cis*-12) y ácido oleico (C18:1 *cis*-9) entre los insaturados y ácido palmítico (C16:0) entre los saturados. El ensilado de HBRI presentó diferencias significativas ($p < 0,001$) respecto al RI en ácido palmítico, a diferencia de lo obtenido en el forraje verde. También se observó un incremento numérico en el contenido de ácido oleico del ensilado respecto del forraje verde en todos los casos, pero, únicamente ALT y TVNF presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) respecto a RI, con valores de 5,79 y 7,93 g 100 g⁻¹ AG respectivamente frente a los 2,11 g 100 g⁻¹ del RI. Igual que en el caso del forraje verde, casi todas las alternativas forrajeras, excepto TVRI y ALTRI, fueron más ricas en ácido linolénico ($p < 0,05$) que el RI destacando de nuevo el TVNF con 29,71 g 100 g⁻¹ frente a los 15,16 g 100 g⁻¹ del RI. Todos los ensilados presentaron menos cantidad ($p < 0,01$) de ácido linolénico que el RI. No se observaron diferencias significativas respecto a RI en la proporción de AG saturados e insaturados.

Tabla 4.3. Valor nutritivo, aporte energético y parámetros fermentativos del ensilado de los forrajes de invierno ensayados.

	RI ¹	OLONL	HB	TV	ALT	NF	HBRI	TVRI	ALTRI	HBNF	TVNF	ALTNF	rsd
Valor nutritivo y aporte energético													
Materia seca (MS)	20,55	23,72	17,24	19,02	21,45	19,75	17,09	28,15**	25,09	14,43	34,49***	21,47	2,779
Cenizas (CEN)	11,05	9,68	9,56	12,15	9,11	9,28	11,09	10,07	10,33	9,93	9,57	10,16	1,506
Materia orgánica (MO)	88,95	90,32	90,44	87,85	90,89	90,72	88,91	89,93	89,67	90,07	90,43	89,84	1,506
Proteína bruta (PB)	9,64	11,49	17,45***	17,94***	15,55***	13,94	14,37***	6,49*	8,10	15,67***	12,40	15,35***	1,868
Fibra ácido detergente (FAD)	30,45	35,26	42,63***	33,13	37,61**	29,27	40,25***	34,01	35,40	44,47***	36,50	33,91	3,308
Fibra neutro detergente (FND)	49,74	50,10	53,75	48,32	47,29	41,78	58,29***	52,44	53,41	56,59**	49,94	47,16	3,838
Digestibilidad de la MO <i>in vivo</i> (Dvivo)	77,52	70,18*	68,69***	70,47*	78,09	75,87	65,37***	67,80***	68,37***	66,41***	70,25*	72,93	4,366
Energía metabolizable (EM)	11,03	10,15	9,94*	9,92*	11,35	11,01	9,30***	9,76**	9,81**	9,57**	10,16	10,48	0,681
Parámetros fermentativos													
pH	4,11	3,94	4,23	4,73***	3,98	4,04	4,19	4,08	3,92	4,16	4,31	4,00	0,254
N amoniacal (N-NH ₃)	9,04	4,08	9,04	15,12	7,77	3,19	9,22	4,58	6,00	10,95	2,50	5,29	5,795
Ácido láctico (LAC)	6,99	6,71	7,27	3,76**	9,49	3,43***	7,13	4,65	7,68	10,19	4,05**	8,57	1,633
Ácido acético (ACE)	4,07	1,85*	4,29	4,77	1,73	1,52	4,35	2,06*	2,09	3,27	1,05	1,55	1,295
Ácido propiónico (PRO)	0,11	<LC	0,13	0,36	<LC	<LC	0,03	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0,236
Ácido butírico (BUT)	0,83	0,14	<LC	1,45	0,04	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0,767

RI: raigrás italiano; OLONL: vegetación espontánea; HB: haba forrajera; ALT: altramuz blanco; TV: trébol violeta; NF: nabo francés; MS (%); CEN (% MS); MO (% MS); PB (% MS); FAD (% MS); FND (% MS); Dvivo (%); EM (MJ kg MS⁻¹); N-NH₃ (% N total); LAC (% MS); ACE (% MS); PRO (% MS); BUT (% MS); <LC: por debajo del límite de cuantificación. No se incluye la colza (ni en monocultivo ni en intercultivo con otras especies) al no haberse establecido en ningún año de estudio.

¹: Las alternativas se compararon estadísticamente frente al RI. Los resultados del RI se calcularon como media ponderada de los dos cortes realizados en primavera.

rsd: desviación estándar residual; ***: p≤0,001; **: p≤0,01; *: p≤0,05; ns: no significativo (p>0,05).

Los valores corresponden a la media de los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015), excepto para el altramuz (en monocultivo e intercultivo con otras especies), que se corresponde con los años 2013-2014 y 2014-2015 y para el nabo francés (en monocultivo e intercultivo con otras especies) que se corresponde únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014).

Tabla 4.4. Perfil de ácidos grasos (g 100 g⁻¹ AG) del ensilado de las alternativas forrajeras de invierno evaluadas (en monocultivo o en intercultivo).

	RI	OLONL	HB	TV	ALT	NF	HBRI	TVRI	ALTRI	HBNF	TVNF	ALTNF	rsd
Caproico (C6:0)	<LC	<LC	<LC	0,65**	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	0,344
Caprílico (C8:0)	0,15	0,18	0,20	0,18	0,16	0,45*	0,18	0,12	0,12	0,22	0,22	0,18	0,134
Nonanoico (C9:0)	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	<LC	
Cáprico (C10:0)	0,01	0,02	0,08**	0,02	0,03	0,08	0,11***	0,03	0,03	0,10**	0,01	0,02	0,032
Láurico (C12:0)	5,72	0,39	4,49	2,69	3,39	-	6,03	11,00	8,87	-	-	-	3,440
Mirístico (C14:0)	0,51	0,33	0,52	0,42	0,43	0,54	0,62	0,60	0,56	0,55	0,35	0,53	0,124
Pentadecanoico (C15:0)	0,11	0,15	0,24***	0,20*	0,13	0,21	0,27***	0,16	0,13	0,31***	0,11	0,12	0,052
Palmítico (C16:0)	19,22	16,01	22,56	17,93	16,70	21,72	24,82***	17,81	18,41	22,81	14,47	17,21	2,484
Palmitoleico (C16:1 <i>cis</i> -9)	0,22	0,31	0,26	0,17	0,32	0,45	0,27	0,34	0,33	0,26	0,37	0,51	0,120
Heptadecanoico (C17:0)	0,10	0,17	0,24***	0,18	0,14	0,23**	0,24***	0,16	0,13	0,34***	0,13	0,12	0,053
Esteárico (C18:0)	0,74	1,57*	2,52***	1,79***	1,51*	2,03***	2,05***	1,14	1,18	2,78***	1,41	1,67	0,463
Oleico (C18:1 <i>cis</i> -9)	2,11	7,24***	4,31	3,83	5,79*	6,78	3,33	4,37	4,04	4,19	7,93**	7,25	2,232
Vaccénico (C18:1 <i>cis</i> -11)	0,42	0,82***	0,60	0,54	0,73*	0,70	0,51	0,56	0,63	0,52	0,81	0,89	0,181
Linoleico (C18:2 <i>cis</i> -9 <i>cis</i> -12)	15,16	33,32***	27,42***	22,55*	25,87***	24,99**	23,22**	20,24	19,93	26,26***	29,71***	25,88*	3,979
Linolénico (C18:3 <i>cis</i> -9 <i>cis</i> -12 <i>cis</i> -15)	55,43	39,13***	35,21***	48,38	44,32***	38,84***	37,88***	43,09***	45,31**	40,65***	43,93***	45,05**	4,995
Araquídico (C20:0)	0,08	0,18	0,49***	0,26	0,28	0,67***	0,41***	0,19	0,18	0,76***	0,18	0,20	0,138
Behénico (C22:0)	0,07	0,08	0,10	0,14	0,08	0,25*	0,08	0,12	0,11	0,24	0,11	0,17	0,066
Σ Saturados	26,69	19,07	31,62	24,45	22,86	26,17	34,80	26,11	29,73	28,12	16,98	13,48	5,735
Σ Insaturados	73,34	80,82	67,47	75,48	77,03	71,75	65,20	57,16	70,24	71,88	82,76	53,05	13,525

RI: raigrás italiano; OLONL: vegetación espontánea; HB: haba forrajera; ALT: altramuz blanco; TV: trébol violeta; NF: nabo francés. No se incluye la colza en monocultivo (ni en intercultivo con otras especies) al no haberse establecido en ningún año de estudio.

¹: Las alternativas se compararon estadísticamente frente al RI. Los resultados del RI se calcularon como media ponderada de los dos cortes realizados en primavera.

rsd: desviación estándar residual; ***: p≤0,001; **: p≤0,01; *: p≤0,05; ns: no significativo (p>0,05).

Los valores corresponden a la media de dos años agronómicos de estudio (2013-2014 y 2014-2015) excepto para el para el nabo francés (en monocultivo e intercultivo con otras especies) que se corresponde únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014).

En la Figuras 4.5 y 4.6 se muestra la evolución de los valores de pH y temperatura durante los diez días posteriores a la apertura de los microsilos durante la evaluación de estabilidad aeróbica.

Los resultados muestran que la temperatura del ensilado de RI aumenta en 2°C tras cuatro días de exposición a temperatura ambiente, lo que indica un rápido deterioro de este ensilado tras su apertura. El ALT se mantuvo estable durante 7 días tras la apertura y el NF durante ocho días. El HB en monocultivo, aunque presentó un aumento sostenido de temperatura tras su apertura, este incremento no llegó a alcanzar en ningún momento los 2°C manteniéndose estable durante todo el periodo considerado. De todas las alternativas ensayadas, el mejor comportamiento correspondió al TV que no sufrió incremento la temperatura.

El pH del ensilado de RI se incrementó a partir del tercer día de exposición al aire, mientras que los pH de los ensilados de monocultivo se mantuvieron estables durante toda la prueba de estabilidad aeróbica.

En los intercultivos se observó que el forraje más estable fue HBRI manteniéndose constante en pH y temperatura durante los diez días de exposición. Sin embargo, el HB asociado con NF sufrió un notable aumento en el pH tras siete días de apertura. El trébol, que mantuvo su temperatura constante en monocultivo, presentó un aumento de este parámetro a los pocos días de su apertura en sus intercultivos (TVRI y TVNF). En el caso del altramuz, el valor de pH fue constante en sus intercultivos (ALTRI y ALTNF) hasta el octavo día de apertura y la temperatura comenzó a aumentar a los seis días de exposición a la temperatura ambiente.

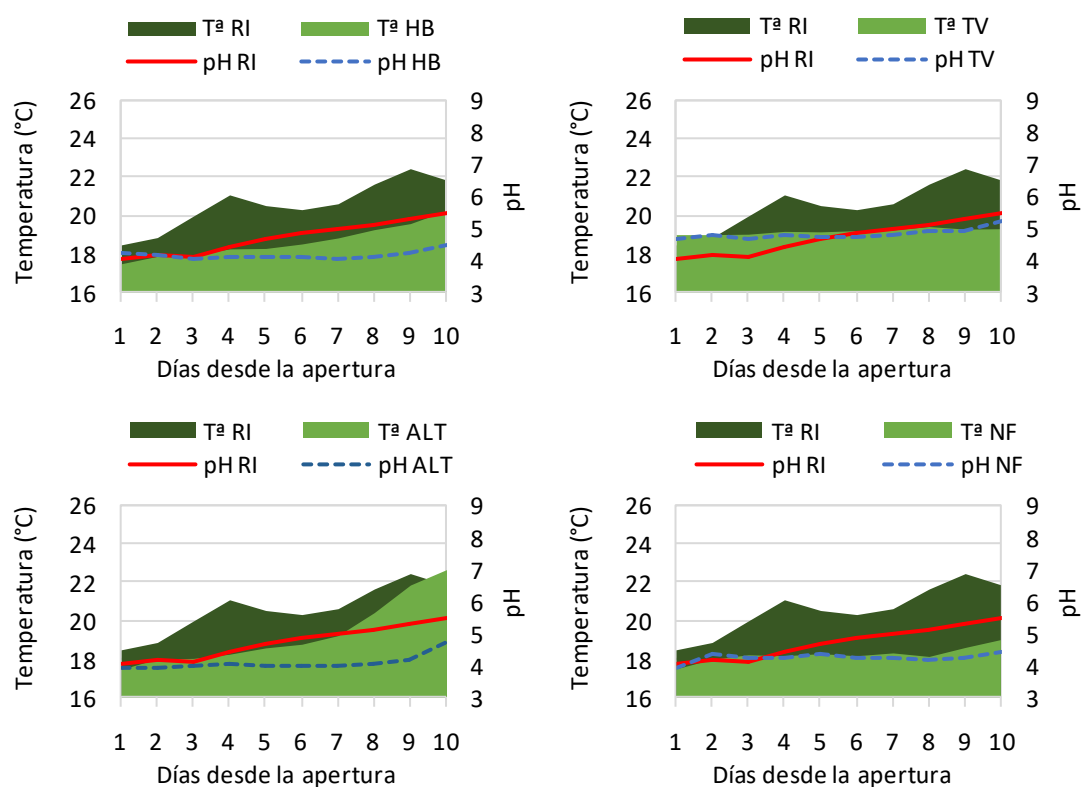


Figura 4.5. Estabilidad aeróbica (variación de pH y temperatura en °C) de los micro ensilados de los forrajes en monocultivo ensayados (haba forrajera -HB-, trébol violeta -TV-, altramuz blanco -ALT- y nabo francés -NF-) tras la apertura y exposición a la temperatura ambiente durante un período de 10 días comparados frente al raigrás italiano (RI). Los valores corresponden a la media de los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014, 2014-2015), excepto para ALT que se corresponde con los años 2013-2014 y 2014-2015 y para NF que se corresponde únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014). La temperatura ambiente promedio durante el período de exposición fue de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

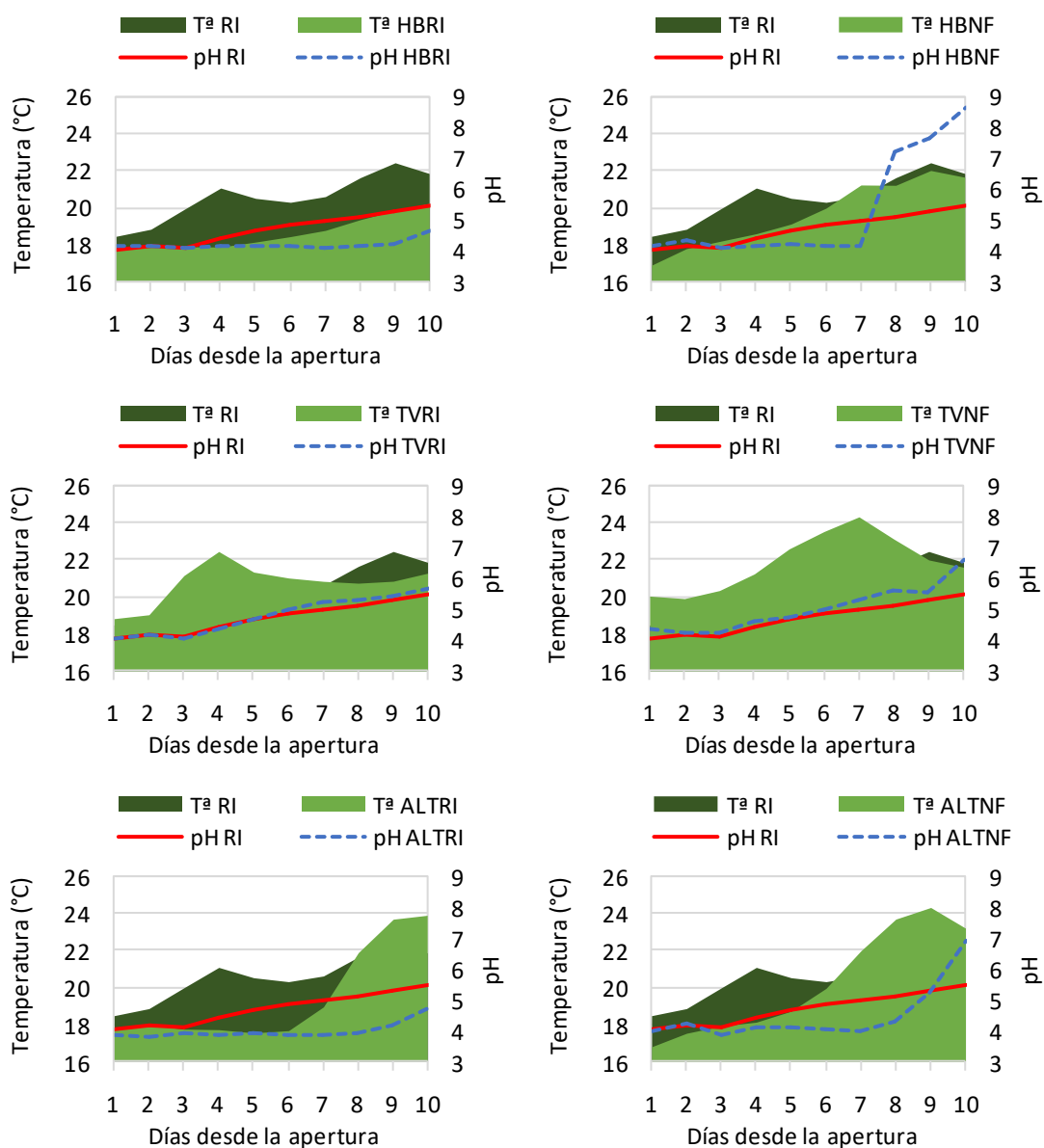


Figura 4.6. Estabilidad aeróbica (variación de pH y temperatura en °C) de los micro ensilados de los forrajes en intercultivo ensayados (haba-raigrás italiano -HBRI-, haba-nabo francés -HBNF-, trébol violeta-raigrás italiano -TVRI-, trébol violeta-nabo francés -TVNF-, altramuz-raigrás -ALTRI- y altramuz-nabo francés -ALTNF-) tras la apertura y exposición a la temperatura ambiente durante un período de 10 días comparados frente al raigrás italiano (RI). Los valores corresponden a la media de los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014, 2014-2015), excepto para ALTRI que se corresponde con los años 2013-2014 y 2014-2015 y para HBNF, TVNF y ALTNF que se corresponden únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014). La temperatura ambiente promedio durante el período de exposición fue de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

4.3.4. Cultivo de verano

Dado que lo que se pretendía era evaluar la influencia del cultivo de invierno sobre la producción del cultivo subsiguiente, solamente se cultivó maíz en aquellas parcelas en las que la alternativa invernal se desarrolló completamente. Por tanto, en el caso de ALT y ALTRI, los datos de producción de maíz corresponden a los años 2013-2014 y 2014-2015 y los del NF y sus intercultivos (HBNF, TVNF y ALTNF) al año 2014-2015. No se disponen de datos de producción de maíz de las subparcelas precedidas por COL ya que este cultivo no consiguió implantarse ninguno de los tres años de estudio. Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas en la producción de maíz independientemente del cultivo de invierno precedente en la rotación obteniéndose una producción media de 18723 ± 2963 t MS ha⁻¹ (Figura 4.7).

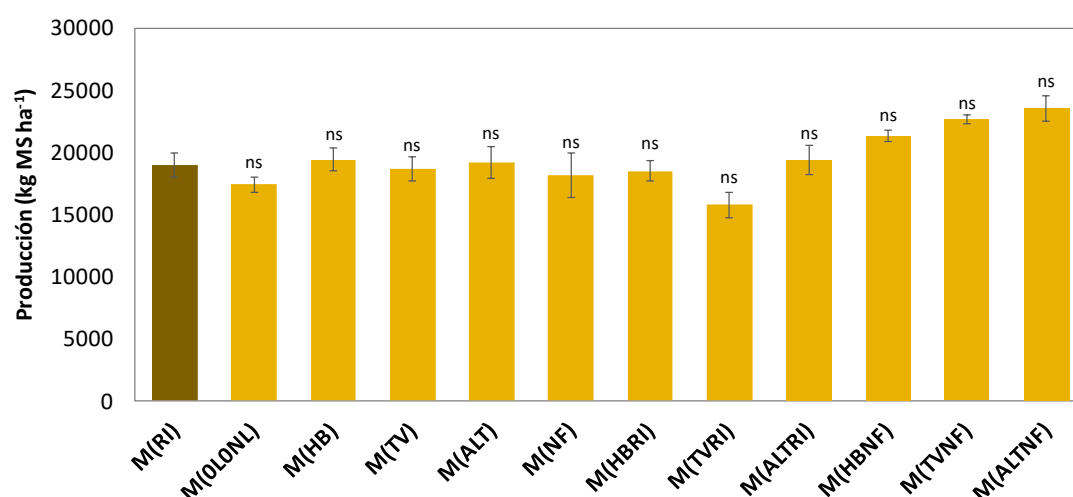


Figura 4.7. Rendimientos medios (kg MS ha⁻¹) del cultivo de verano (maíz forrajero -M-) en función del cultivo precedente: raigrás italiano (RI), vegetación espontánea (OLONL), haba forrajera (HB), trébol violeta (TV), altramuz blanco (ALT), nabo francés (NF) y sus intercultivos con RI o NF (HBRI, TVRI, ALTRI, HBNF, TVNF y ALTNF). Las alternativas se compararon estadísticamente frente a la producción del maíz en la cual el cultivo precedente fue RI. Los valores corresponden a la media de los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015), excepto para el altramuz (en monocultivo e intercultivo con otras especies), que se corresponde con los años 2013-2014 y 2014-2015 y para el nabo francés (en monocultivo e intercultivo con otras especies) que se corresponde únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014). No se incluye la colza (ni en monocultivo ni en intercultivo con otras especies) al no haberse establecido en ningún año de estudio. ns: no significativo ($p > 0,05$).

El valor nutritivo, aporte energético y rendimientos por hectárea del maíz forrajero se presentan en la Tabla 4.5. Únicamente el maíz cultivado en las subparcelas con NF como cultivo precedente presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) respecto del cultivado en rotación con RI en los contenidos de FND, Dvivo y EM.

No se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en el rendimiento en MOD (kg ha^{-1}) en ninguna de las subparcelas de maíz forrajero. En el rendimiento proteico (kg PB ha^{-1}), solamente se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en M(TVRI) debido a la menor producción de MS ha^{-1} de esta subparcela. Por el contrario, en el rendimiento energético se observaron diferencias significativas en todas las subparcelas exceptuando M(HBRI) siendo todas las alternativas mayores en rendimiento energético (GJ EM ha^{-1}) que la precedida por RI exceptuando M(TV) y M(TVRI).

4.3.5. Conjunto de la rotación

En la Figura 4.8 se representan los rendimientos de MS, PB y MOD en kg ha^{-1} y de EM en GJ ha^{-1} de la rotación completa (cultivo de invierno más cultivo de verano). Se observó que las rotaciones que incluyeron TV, NF y TVRI como alternativa de invierno fueron significativamente inferiores ($p < 0,05$) en rendimiento productivo que la rotación convencional raigrás italiano-maíz forrajero (RI+M). El resto de rotaciones alternativas igualaron ($p > 0,05$) a la convencional.

El rendimiento proteico de la rotación HB+M fue significativamente ($p < 0,05$) superior al de la rotación convencional con $2347 \text{ kg PB ha}^{-1}$ frente a los $1956 \text{ kg PB ha}^{-1}$. Las rotaciones ALT+M y HBNF+M, mostraron numéricamente mayor rendimiento proteico que RI+M (2357 y $2409 \text{ kg PB ha}^{-1}$) pero no se observaron diferencias significativas debido a que estos resultados corresponden únicamente a dos y un año agronómico respectivamente.

Al igual que lo observado en el rendimiento productivo, las rotaciones que incluyeron trébol violeta (TV+M y TVRI+M) y la rotación NF+M, presentaron rendimientos en materia orgánica digestible muy por debajo ($p < 0,05$) de los obtenidos con la rotación convencional con valores de 14644 , 14683 y $14919 \text{ kg MOD ha}^{-1}$ frente a los $18684 \text{ kg MOD ha}^{-1}$ de la rotación convencional. En el resto de rotaciones no se observaron diferencias significativas.

En cuanto al rendimiento energético total, la rotación HBRI+M igualó a la convencional mientras que TVNF+M y ALTNF+M la superaron con valores de 301 y $371 \text{ GJ EM ha}^{-1}$ respectivamente frente a $299 \text{ GJ EM ha}^{-1}$ ($p < 0,001$).

Tabla 4.5. Valor nutritivo y aporte energético del cultivo de verano (maíz forrajero).

	M(RI) ¹	M(OLONL)	M(HB)	M(TV)	M(ALT)	M(NF)	M(HBRI)	M(TVRI)	M(ALTRI)	M(HBNF)	M(TVNF)	M(ALTNF)	rsd
Valor nutritivo y aporte energético													
Materia seca (MS)	31,74	34,30	34,69	34,04	35,46	32,73	33,23	33,03	33,52	33,17	33,60	35,12	2,289
Materia orgánica (MO)	96,32	96,46	96,36	95,97	96,57	96,95	96,33	96,29	96,54	96,33	96,56	96,09	0,335
Proteína bruta (PB)	6,96	6,57	6,54	6,94	6,52	6,78	6,79	6,33	6,30	7,11	6,80	7,44	0,632
Fibra ácido detergente (FAD)	21,81	21,93	23,04	23,46	21,60	18,55	22,28	22,85	21,33	20,56	19,81	21,36	1,738
Fibra neutro detergente (FND)	42,72	41,34	43,58	43,82	42,29	35,45*	42,58	43,70	42,08	39,70	38,06	40,62	2,448
Almidón (ALM)	34,67	35,79	33,83	32,61	34,96	43,04	34,42	33,78	32,95	34,81	38,65	35,04	1,936
Digestibilidad de la MO <i>in vivo</i> (Dvivo)	75,18	75,99	74,58	74,69	75,32	79,11*	75,32	74,70	75,62	77,11	77,78	76,33	1,434
Energía metabolizable (EM)	11,59	11,73	11,50	11,47	11,64	12,27*	11,61	11,51	11,68	11,88	12,02	11,74	1,963
Rendimientos por hectárea													
kg PB ha ⁻¹	1307	1130	1263	1284	1259	1220	1260	1004*	1226	1517	1538	1751	198,3
kg MOD ha ⁻¹	13657	12650	13950	13193	13979	13923	13433	11322	14175	15839	16979	17276	1689,0
GJ EM ha ⁻¹	219	202***	223***	211***	224***	223***	215	181***	227***	253	272***	276***	11,2

M: maíz forrajero y entre paréntesis el cultivo precedente (RI: raigrás italiano; OLONL: vegetación espontánea; HB: haba forrajera; ALT: altramuz blanco; TV: trébol violeta y NF: nabo francés); MS (%); CEN (% MS); MO (% MS); PB (% MS); FAD (% MS); FND (% MS); ALM (% MS); Dvivo (% MS); EM (MJ kg MS⁻¹); MOD: materia orgánica digestible.

rsd: desviación estándar residual; ***: p≤0,001; **: p≤0,01; *: p≤0,05; ns: no significativo (p>0,05).

¹: Las alternativas se compararon estadísticamente frente a M(RI).

Los valores corresponden a la media de los tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014, 2014-2015), excepto para el altramuz (en monocultivo e intercultivo con otras especies), que se corresponde con los años 2013-2014 y 2014-2015 y para el nabo francés (en monocultivo e intercultivo con otras especies) que se corresponde únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014).

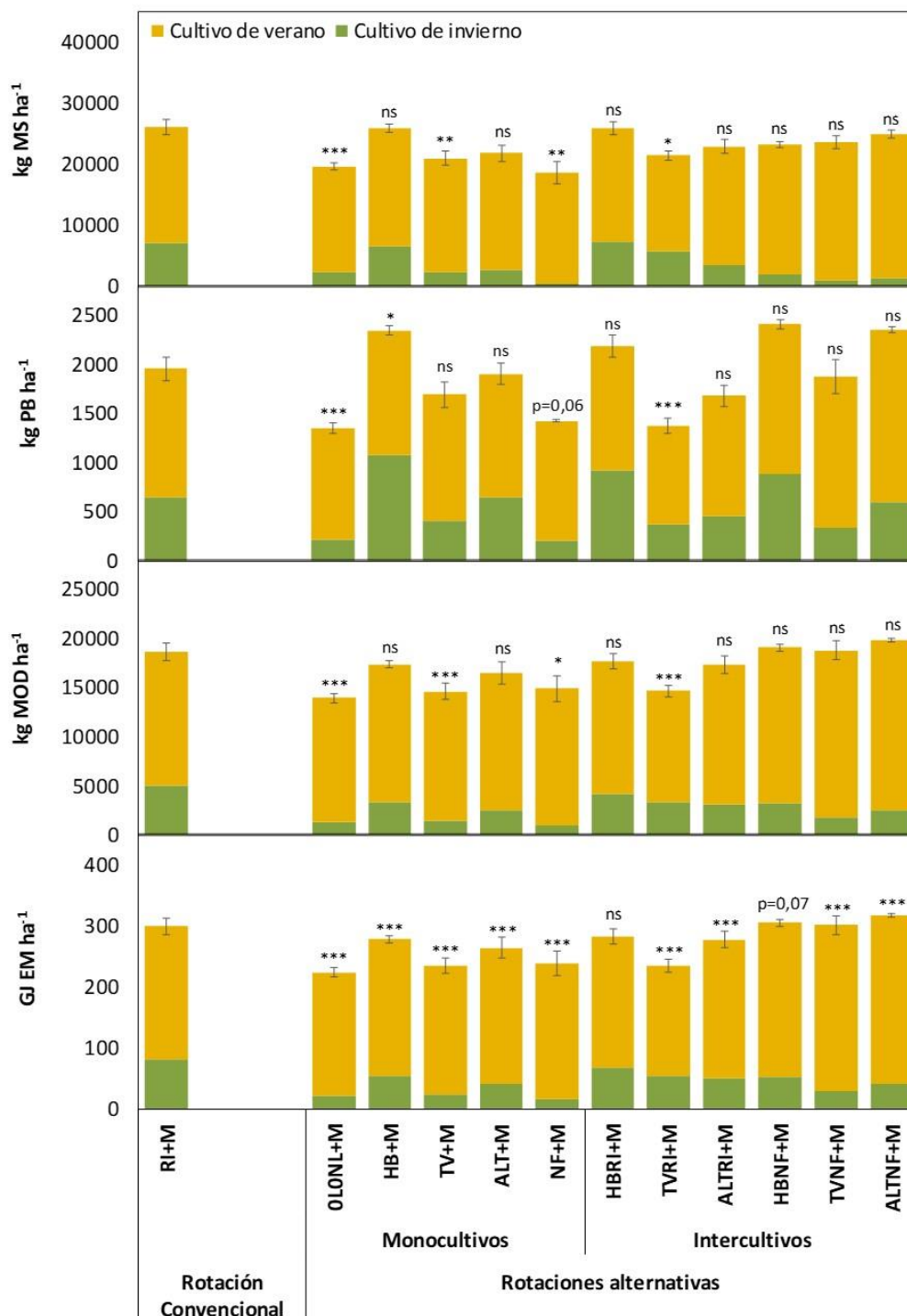


Figura 4.8. Rendimientos en materia seca (MS), proteína bruta (PB), materia orgánica digestible (MOD) en kg ha⁻¹ y energía metabolizable (EM) en GJ ha⁻¹ del conjunto de la rotación forrajera. Raigrás italiano (RI), vegetación espontánea (OLONL), haba forrajera (HB), trébol violeta (TV), altramuz blanco (ALT) y nabo francés (NF), sus intercultivos con RI o NF (HBRI, TVRI, ALTRI, HBNF, TVNF y ALTNF) y maíz forrajero (M) durante los años agronómicos 2012-2013, 2013-2014 y 2014-2015 excepto para el altramuz (en monocultivo e intercultivo con otras especies), que se corresponde con los años 2013-2014 y 2014-2015 y para el nabo francés (en monocultivo e intercultivo con otras especies) que se corresponde únicamente con el segundo año de estudio (2013-2014). No se incluye la colza (ni en monocultivo ni en intercultivo con otras especies) al no haberse establecido en ningún año de estudio. ***: p≤0,001; **: p≤0,01; *: p≤0,05; ns: no significativo (p>0,05).

4.3.6. Suelo

Las propiedades fisicoquímicas del suelo se muestran en la Tabla 4.6. Solo se tuvieron en cuenta los cambios en las propiedades del suelo para las parcelas en las que los cultivos invernales que se desarrollaron al menos dos de los tres de años de estudio.

No se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en el pH del suelo al final del estudio respecto al pH de partida. Se observaron diferencias significativas en la CE entre el comienzo y el final del experimento en todos los tratamientos, pero sin cambios en la clasificación del suelo que continuó siendo no salino durante todo el estudio ($CE < 0,2 \text{ dS m}^{-1}$). El contenido de MOS aumentó en todos los tratamientos en comparación con la situación de partida ($p < 0,001$). Las parcelas bajo ALT y ALTRI presentaron mayor contenido en MOS que el resto de tratamientos ($p < 0,001$) y también una relación C/N más alta con respecto al inicio. Se observó un aumento en la concentración de Ca en todos los tratamientos con respecto a la situación inicial, especialmente en ALT y ALTRI. Al comienzo del experimento, el suelo presentó una baja concentración de K ($0,31 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$) pero, la aplicación de fertilizantes, tanto orgánicos como inorgánicos, aumentó ($p < 0,05$) el contenido de K del suelo hasta rangos altos ($0,84\text{-}1,02 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$) para 0L0NL, RI, HB, ALT, HBRI y ALTRI, y muy altos ($K > 1,02 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$) para TV y TVRI, aunque no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. El contenido de Na fue algo elevado al comienzo del estudio ($\text{Na} > 1,5 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$) pero disminuyó significativamente ($p < 0,05$) con todos los tratamientos excepto con TV. La CICE se incrementó con los tratamientos, pero permaneció dentro del rango considerado como normal ($10\text{-}20 \text{ cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$). El Al en el complejo de cambio Al_{CICE} , disminuyó significativamente ($p < 0,05$) en todos los tratamientos. No se observaron diferencias significativas en el contenido en P respecto a la situación inicial.

Tabla 4.6. Propiedades fisicoquímicas del suelo bajo vegetación espontánea (OLONL), raigrás italiano (RI), haba forrajera (HB), trébol violeta (TV) y altramuz blanco (ALT) en monocultivo y sus intercultivos con RI (HBRI, TVRI y ALTRI).

	T0	OLONL	RI	HB	TV	ALT	HBRI	TVRI	ALTRI	eer	p (forraje)	p (año)
CC (%)	18,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d _a (g cm ⁻³)	1,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
pH	6,46	6,76	6,51	6,66	6,65	6,73	6,73	6,65	6,70	0,180	0,082	<0,001
CE (dS m ⁻¹)	0,13 ^a	0,07 ^b	0,06 ^b	0,07 ^b	0,07 ^b	0,07 ^b	0,07 ^b	0,07 ^b	0,07 ^b	0,016	<0,001	<0,001
MOS (%)	2,09 ^c	4,27 ^b	4,17 ^b	4,32 ^b	4,07 ^b	5,82 ^a	4,08 ^b	4,44 ^b	5,53 ^a	0,615	<0,001	<0,001
C (%)	1,21 ^c	2,48 ^b	2,42 ^b	2,51 ^b	2,36 ^b	3,38 ^a	2,37 ^b	2,58 ^b	3,21 ^a	0,357	<0,001	<0,001
N (%)	0,32 ^{ab}	0,30 ^{ab}	0,33 ^{ab}	0,32 ^{ab}	0,34 ^{ab}	0,25 ^b	0,32 ^{ab}	0,42 ^a	0,21 ^b	0,098	0,030	<0,001
C/N	3,76 ^d	9,50 ^{cd}	11,23 ^{abc}	8,73 ^{cd}	9,05 ^{cd}	16,12 ^{ab}	9,78 ^{bcd}	7,76 ^{cd}	17,53 ^a	5,575	0,008	<0,001
Ca (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	6,50 ^d	8,92 ^c	8,83 ^c	9,33 ^{bc}	9,32 ^{bc}	10,50 ^a	9,32 ^{bc}	9,13 ^{bc}	10,10 ^{ab}	0,767	<0,001	<0,001
Mg (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	2,66	1,97	1,81	1,96	2,00	1,63	2,13	2,06	1,81	0,654	0,583	<0,001
K (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	0,31 ^b	1,02 ^a	0,97 ^a	0,84 ^a	1,06 ^a	0,85 ^a	0,93 ^a	1,10 ^a	0,86 ^a	0,277	0,011	0,008
Na (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	1,75 ^a	1,26 ^{bc}	1,28 ^{bc}	1,24 ^{bc}	1,50 ^{ab}	1,19 ^c	1,38 ^{bc}	1,31 ^{bc}	1,28 ^{bc}	0,235	0,026	0,021
Al (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	0,17	0,12	0,15	0,12	0,12	0,11	0,13	0,14	0,13	0,034	0,156	<0,001
CICE (cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹)	11,40 ^b	13,30 ^a	13,04 ^a	13,49 ^a	14,00 ^a	14,29 ^a	13,89 ^a	13,74 ^a	14,18 ^a	1,023	0,013	<0,001
Al _{CICE} (%)	1,53 ^a	0,90 ^b	1,17 ^b	0,89 ^b	0,90 ^b	0,79 ^b	0,93 ^b	0,99 ^b	0,90 ^b	0,259	0,013	<0,001
P (mg kg ⁻¹)	26,34	21,91	22,18	23,91	20,91	23,60	23,57	23,98	23,88	3,988	0,521	0,019

T0: propiedades del suelo al comienzo del experimento en 2012 en una finca experimental en situación de barbecho; CC: capacidad de campo; d_a: densidad aparente; CE: conductividad eléctrica; MOS: materia orgánica del suelo; CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva; Al_{CICE}: Al en el complejo de cambio; eer: error estándar residual.

^{abc} Diferentes letras indican diferencias significativas entre los tratamientos.

Los datos se presentan como media tres años agronómicos de estudio (2012-2013, 2013-2014, 2014-2015) excepto para ALT y ALTRI que se corresponden con los años 2013-2014 y 2014-2015.

4.4. DISCUSIÓN

La climatología es uno de los principales factores que afecta al desarrollo de los cultivos y causan gran variabilidad en la producción agrícola. Cuando las precipitaciones son excesivas, aunque el terreno no presente graves problemas de compactación ni de permeabilidad, pueden aparecer encharcamientos temporales suficientes para afectar gravemente a la producción, o incluso producir la muerte de los cultivos más sensibles (Ibañez, 2007). En este estudio, nos encontramos con fluctuaciones interanuales importantes en el desarrollo y rendimiento final de algunos cultivos (altramuz blanco, colza forrajera y nabo francés) que, en un primer momento, se atribuyeron únicamente a este factor. Pero, durante el segundo año, con un régimen de precipitaciones menor, la colza tampoco completó su desarrollo, mientras que el altramuz, que fracasó en su implantación el primer año, consiguió desarrollarse sin problema los años restantes, incluido el tercer año a pesar de haber sido igual de lluvioso que el primero. Este comportamiento sugiere que estas especies forrajeras, colza y altramuz, son más dependientes de las condiciones edáficas que de las termopluviométricas. La textura del suelo en este estudio se clasificó, en función del análisis granulométrico, como franco arcillo-arenosa. Los suelos francos son suelos equilibrados, adecuados desde el punto de vista agrícola ya que sus propiedades se presentan compensadas (Porta-Casanellas *et al.*, 2003). Sin embargo, la componente arcillosa de la textura hace al suelo susceptible de colmatarse de agua en períodos de lluvia prolongados perdiendo permeabilidad y capacidad de aireación. Bajo estas circunstancias, la colza no fue capaz de desarrollarse. Sin embargo, en estudios llevados a cabo por Jiménez-Calderón *et al.* (2017), con regímenes de precipitaciones similares, pero en suelos de textura franco arenosa, la colza consiguió implantarse con éxito, ya que estos suelos poseen una mayor aireación debida a la mayor porosidad existente, y esto hace que el drenaje sea mucho mayor. El nabo francés solo completó su desarrollo el segundo año, cuando las condiciones climáticas fueron más favorables. Por tanto, al contrario que la colza, esta especie parece ser más dependiente del régimen pluviométrico que de la textura del suelo. En lo que respecta al altramuz, el hecho de que el segundo año completara su desarrollo, pudo mejorar las condiciones edáficas de la subparcela asegurando su implantación al año siguiente, ya que el sistema radicular de este cultivo posee la capacidad de mejorar la textura y el drenaje del suelo (Fumagalli *et al.*, 2014; Reddy, 2016) evitando que el encharcamiento causara la asfixia radicular al año siguiente.

El haba forrajera y el trébol violeta fueron capaces de completar su desarrollo los tres años de estudio con independencia de las condiciones meteorológicas y edáficas. Además, HB,

HBRI y TVRI alcanzaron producciones que no difieren estadísticamente de las obtenidas con los dos cortes acumulados de RI con la ventaja añadida de que concentraron toda la producción en un único corte. Cabe destacar que, estos cultivos que incorporaron leguminosas no precisaron aporte complementario de N como en el caso del RI. Por tanto, no solo se obtuvo igual producción con menos fertilización, sino que, además, el uso de mecanizado fue menor, lo que implica ahorros energéticos y beneficios en la salud del suelo al reducirse la compactación derivada del continuo mecanizado. De forma general, las alternativas en intercultivo fueron más productivas que los monocultivos. Este hecho ya ha sido puesto de manifiesto por varios autores (Tosti y Guiducci, 2010; Monti *et al.*, 2016) que exponen que las asociaciones de cultivos, además de rendimientos competitivos con insumos reducidos, tienen otros aspectos beneficiosos como mejor control de plagas (Lopes *et al.*, 2016), mitigación de la contaminación (Luo *et al.*, 2016) y mayor rendimiento forrajero por unidad de superficie (Smith *et al.*, 2013). Cabe destacar que la asociación de familias botánicas, cuando tienen ciclos de desarrollo y momentos de aprovechamiento similares, puede ser una estrategia para incrementar la fertilidad del suelo y obtener producciones de mayor cantidad y calidad que los monocultivos de las mismas especies en superficies equivalentes (Jolliffe, 1997; Li *et al.*, 1999; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2008) debido principalmente al incremento de fertilidad del suelo (Doltra y Olesen, 2013) y a la reducción de malas hierbas (Agegnehu *et al.*, 2006).

Además del rendimiento productivo, uno de los criterios fundamentales a tener en cuenta a la hora de seleccionar un cultivo para sustituir al raigrás italiano, debe ser la autosuficiencia proteica, ya que existe la pretensión de reducir costes y limitar la dependencia de proteína vegetal importada que la UE tiene de terceros países (Miguelañez, 2017). Los gastos de alimentación en las explotaciones lecheras de Asturias suponen más del 70% de los gastos totales de la explotación (Migoya y Fernández-Fano, 2017) y, dentro de la ración, las fuentes de proteína son los ingredientes más costosos. Por tanto, la reducción de esta partida mediante la producción de forrajes propios resulta clave para la rentabilidad y sostenibilidad económica de esta actividad. Tal y como se esperaba, las leguminosas en monocultivo (HB, TV, ALT) presentaron contenidos en PB mucho mayores que los obtenidos con RI, tanto en el forraje verde como en el ensilado. Estos resultados, coinciden con estudios previos llevados a cabo por Borreani *et al.* (2009), en los que afirman que los cultivos de leguminosas, como el guisante, las habas o los altramuces utilizados como ensilado, son una fuente barata de proteína y almidón y pueden mejorar la eficiencia de los sistemas de producción en las explotaciones lecheras al reducir la necesidad de concentrados.

Dado que las alternativas al raigrás italiano seleccionadas se destinarán a la elaboración de ensilado, un tercer factor a tener en cuenta es la aptitud de dichas alternativas para ensilar correctamente. Para ello, se utilizó el índice de ensilabilidad (IE) desarrollado por Martínez-Fernández *et al.* (2013) que categoriza los forrajes en función de las tres variables fundamentales en el proceso de ensilaje (MS, AZSOL y CT) y que está adaptado a las características de los forrajes para ensilar en la Cornisa Cantábrica. En general, las leguminosas presentan en una menor ensilabilidad que las gramíneas debido a una menor concentración de azúcares solubles (Piñeiro y Pérez, 1992). Sin embargo, en este estudio nos encontramos con que, dos de las leguminosas ensayadas, HB y ALT, presentaron mejor ensilabilidad que el RI. Este hecho puede deberse a que los parámetros que definen la ensilabilidad varían en función de la especie y del estado fenológico del forraje en el momento del corte o a las condiciones climatológicas durante su desarrollo (Martínez-Fernández *et al.*, 2014). En este caso, la CT de las leguminosas, que suele ser del orden de 500 a 600 meq NaOH kg⁻¹ MS (Playne y McDonald, 1966; Tobía *et al.*, 2008), no superó los 350 meq NaOH kg⁻¹ MS, lo que permite una correcta acidificación de la masa forrajera y, por consiguiente, un buen proceso fermentativo.

El valor nutritivo de los forrajes ensilados está condicionado por el contenido proteico, el aporte energético y la digestibilidad que presenta el forraje verde en el momento de su cosecha, así como las alteraciones ligadas a la forma de conservación. Se considera que un ensilado tiene buena calidad nutritiva cuando tiene aproximadamente un 70% de digestibilidad de la MO, menos del 50% de FND y más del 15% de PB (Martínez-Fernández *et al.*, 2014). Los ensilados de HB, TV y ALT tienen un alto valor proteico del (mayor al 15% de PB en todos los casos) respecto al RI. Sin embargo, a excepción del ALT, NF, TVNF y ALTNF, las alternativas tienen menor digestibilidad y contenido energético que RI, ya que el contenido en fibras correlaciona negativamente con la digestibilidad de los alimentos y con su aporte de energía (Grant, 1991). Los valores de digestibilidad y energía en el haba y sus intercultivos se deben a una mayor proporción de pared celular respecto al resto de alternativas. El haba es una leguminosa de alto porte (con tallas a veces superiores a 1,50 m) que necesita lignificar sus tallos para mantenerse erguida a diferencia del resto de forrajes ensayados. Aun así, una digestibilidad por encima del 65% y una EM mayor de 8,5 MJ kg MS⁻¹, se consideran valores aceptables (Argamentería *et al.*, 1997).

La calidad de los ensilados no viene condicionada solamente por su contenido en principios nutritivos, sino que hay que asegurar una correcta fermentación. Uno de los principales indicadores de la calidad de la fermentación es el contenido en N amoniacal respecto

al N total. En función de lo propuesto por Wilkinson (1987), el TV presentó una calidad fermentativa deficiente debido a un contenido de N amoniacal superior al 15% derivado de un elevado desarrollo de bacterias butíricas (>0,5%). Estas bacterias degradan el nitrógeno proteico del forraje hasta ácido butírico y amoniaco (Martínez-Fernández *et al.*, 2014).

En los forrajes ensilados es importante considerar la resistencia al deterioro aeróbico que se produce cuando se abre el silo, ya que puede ocasionar pérdidas de materia seca superiores al 30% al cabo de 8 días de exposición al aire (Martínez-Fernández *et al.*, 2014). Teniendo en cuenta la importancia económica del uso de ensilados y las pérdidas por deterioro, es importante seleccionar forrajes que posean una buena estabilidad aeróbica durante el periodo de suministro a los animales. Los resultados de este estudio pusieron de manifiesto que las leguminosas y el nabo francés en monocultivo y los intercultivos leguminosa-raigrás poseen mejores condiciones de estabilidad aeróbica que el RI, ya que mantuvieron un pH estable en el tiempo y el aumento de la temperatura del ensilado fue posterior al del RI. La elevada estabilidad aeróbica de los ensilados de leguminosas ha sido observada por otros autores (Dewhurst y King, 1998; McAllister *et al.*, 1998; Pahlow *et al.*, 2002). Según Weinberg *et al.* (1993) los ensilados de leguminosas, con bajo contenido de MS y AZSOL, son generalmente más resistentes al deterioro aeróbico que los ensilados de gramíneas en las que las concentraciones de AZSOL son suficientemente elevadas como para promover el crecimiento de levaduras y mohos. Esta cualidad de mantenerse estable durante más tiempo es de especial importancia en explotaciones pequeñas en las cuales el avance del frente del silo es lento.

El pago por calidad de la grasa de la leche es una posibilidad que se está estudiando en la actualidad, por ello, se estableció también como criterio de selección el contenido de ácidos grasos de los forrajes por su potencial transferencia a la leche. Los resultados observados en este estudio coinciden con otros (Bauchart *et al.*, 1984; Hawke, 1973) que reportan que alrededor del 95% del contenido en ácidos grasos presentes en un forraje verde corresponde al ácido linolénico (C18:3 *cis*-9 *cis*-12 *cis*-15), linoleico (C18:2 *cis*-9 *cis*-12) y palmítico (C16:0), de los cuales entre el 50 y 75% corresponde al linolénico (Elgersma, 2015). El ácido palmitoleico (C16:1 *cis*-9) y el oleico (C18:1 *cis*-9) son los otros ácidos grasos principales (Hawke, 1973). En una revisión llevada a cabo por Elgersma (2015) las gramíneas mostraron mayor cantidad de ácido linolénico que las leguminosas y éstas mayor contenido en palmítico y linoleico que las gramíneas, lo que también se corresponde con lo observado en este estudio. Por lo tanto, ninguna de las alternativas ensayadas mejoró el perfil lipídico del RI en relación con la proporción de ácidos grasos insaturados. Generalmente, un ensilado tiene una composición en

ácidos grasos similar a la del forraje verde correspondiente, siempre y cuando el silo haya sido bien compactado y sellado (Dewhurst y King, 1998). Por ello, dado que los ensilados de este estudio fueron elaborados en condiciones controladas de laboratorio, las diferencias respecto al forraje de partida deberían ser mínimas. Ahora bien, coincidiendo con lo expuesto por Morand-Fehr y Tran (2001), en los forrajes conservados las cantidades de ácidos oleico (C18:1 *cis*-9) y linoleico (C18:2 *cis*-9 *cis*-12) aumentan respecto al material original, mientras que el contenido de linolénico (C18:3 *cis*-9 *cis*-12 *cis*-15) desciende.

En los últimos años, muchos estudios se han centrado en la reintroducción sostenible de leguminosas en las rotaciones forrajeras, basándose en sus efectos positivos sobre el rendimiento y características de calidad en cultivos posteriores (Kirkegaard *et al.*, 2008; Preissel *et al.*, 2015; St Luce *et al.*, 2015). Sin embargo, según Preissel *et al.* (2015), la evaluación de las ventajas y desventajas de una rotación debe basarse en una comparación por pares entre cultivos de leguminosa y no leguminosa. Algunos diseños experimentales que implican rotaciones multianuales y multiespecie no proporcionan información sobre los posibles beneficios de rendimiento a las especies que siguen en la secuencia de rotación (Angus *et al.*, 2015). Por lo tanto, es difícil formular conclusiones adecuadas. En este estudio, no se observaron diferencias significativas ni en el rendimiento ni en la calidad nutritiva del maíz forrajero independientemente del cultivo invernal precedente. Estos resultados coinciden con lo observado por Mijangos *et al.* (2015), quienes tampoco encontraron diferencias en la producción de materia seca ni en el valor nutritivo del maíz (excepto para el contenido en ALM) y cuyos cultivos precedentes fueron raigrás italiano con fertilización química y un intercultivo de haba-colza con fertilización orgánica. Sin embargo, estudios llevados a cabo en Galicia señalan que, en una rotación con un intercultivo de raigrás leguminosas de invierno, el maíz rinde un 10% y el girasol un 12% más y, en ambas rotaciones, con un menor aporte de fertilizante nitrogenado (Valladares, 2015; Botana *et al.*, 2016) que la rotación clásica de raigrás italiano-maíz forrajero. En cualquier caso, y a la vista de los resultados obtenidos en el presente trabajo y de los estudios citados, se pone de manifiesto que donde se debe actuar es en el cultivo de invierno, ya que de este depende la producción forrajera y la mayor suficiencia proteica del conjunto de la rotación.

Un indicador fundamental de la calidad de un suelo es su contenido en materia orgánica (MOS), ya que constituye uno de los mayores reservorios de carbono (Ciais *et al.*, 2013). En suelos no cultivados, el contenido MOS depende del tipo de vegetación que mantiene, de los aportes vegetales y animales que recibe y de ciertas propiedades del suelo como textura, acidez,

temperatura, aireación, cantidad y mineralogía de arcillas y actividad biológica (Bot y Benites, 2005). En los suelos agrícolas, la aplicación de fertilizantes aumenta los rendimientos de los cultivos y, por lo tanto, tiene efectos sobre el contenido de MOS (Bauer y Black, 1994). En este estudio, la aplicación de fertilizantes, tanto orgánicos como inorgánicos, aumentó el contenido de MOS con respecto al contenido inicial. Estos contenidos fueron similares para todos los tratamientos excepto para ALT y ALTRI que, como se comentó anteriormente, puede deberse a que su sistema radicular mejora la textura y el drenaje del suelo (Fumagalli *et al.*, 2014). Estos resultados están en concordancia con el estudio llevado a cabo por Crème *et al.* (2016), que concluye que las diferentes especies de plantas y mezclas pueden tener efectos específicos en los parámetros del suelo debido a los efectos de la rizosfera específica de la planta.

Otro parámetro de importancia es la relación C/N ya que informa la salud del suelo y determina el grado de mineralización de la MOS existente, así como el tipo de humus. Por lo tanto, tiene un impacto importante en la disponibilidad de N para la planta. Valores de esta relación entre 8 y 10 indican un alto grado de mineralización de la MO y representa una buena calidad edáfica (Junta de Extremadura, 1992), es decir, un suelo equilibrado con control de liberación de N mineral y contenido de C. En este estudio, HB, TV y HBRI estuvieron dentro del rango óptimo. TVRI mostró una relación C/N menor que 8, lo que indica una mineralización rápida o un exceso de nitrógeno amoniacal. ALT y ALTRI mostraron una relación C/N muy alta (C/N>15). Esta mayor relación C/N puede deberse a un exceso de C y energía e indica una cinética de descomposición lenta de este cultivo, por lo tanto, prácticamente todo el N liberado es tomado por los microorganismos del suelo, dejando muy poco para ser utilizado por las plantas.

La necesidad de enmienda caliza de un suelo se determina en función del grado o porcentaje de saturación del complejo de cambio por el Al. En el presente estudio el porcentaje de Al fue inferior al 10% los tres años y en todos los tratamientos, por lo que no fue necesario recurrir a ninguna práctica de encalado (Martínez-Fernández y Argamentería-Gutiérrez, 2013).

Las leguminosas generalmente tienen mayores demandas de P que las gramíneas, lo que puede limitar su crecimiento (Roscher *et al.*, 2011). En este estudio, solo TV presentó, aunque no de manera significativa, un contenido de P inferior después de tres años en comparación con la situación inicial. A pesar de que no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, el contenido en P del suelo tendió a ser más elevado bajo el intercultivo TVRI. Resultados similares fueron observados por Crème *et al.* (2016) en los que señalan que los

efectos negativos de las leguminosas sobre el P del suelo pueden atenuarse cuando crecen en mezclas con gramíneas.

4.5. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la colza forrajera y el nabo francés no son alternativas viables en las condiciones edafoclimáticas ensayadas.

Las alternativas forrajeras ensayadas tanto en monocultivo como asociadas con raigrás italiano y bajo fertilización orgánica, no influyen en el rendimiento ni en la calidad nutritiva del cultivo de maíz que completa la rotación en comparación con los resultados de la rotación clásica raigrás italiano-maíz en condiciones de manejo convencional.

El haba forrajera y el trébol violeta y sus intercultivos con raigrás italiano fueron las alternativas que presentaron mejor calidad edáfica.

Con el resto de cultivos evaluados y atendiendo a los siguientes criterios: producción, autosuficiencia proteica, ensilabilidad, valor nutritivo y aporte energético, fermentabilidad, resistencia al deterioro aeróbico, perfil de ácidos grasos y perfil edáfico, se concluye que las habas forrajeras en monocultivo o asociadas con raigrás italiano son una clara alternativa al raigrás italiano como cultivo de invierno para rotar con maíz.

CAPÍTULO 5

Rendimiento y calidad del ensilado de haba forrajera en monocultivo o en intercultivo con raigrás italiano

5. RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL ENSILADO DE HABA FORRAJERA EN MONOCULTIVO O EN INTERCULTIVO CON RAIGRÁS ITALIANO

5.1. INTRODUCCIÓN

Tras la evaluación de los cultivos en parcela experimental (Capítulo 4), se seleccionaron las dos alternativas forrajeras de invierno con mejores resultados agronómicos para ser evaluadas a nivel de explotación junto con el monocultivo convencional de raigrás italiano en. De esta manera se pueden evaluar algunos factores que a nivel de parcela experimental no pueden ser tenidos en cuenta como, por ejemplo, el efecto sobre el terreno de la maquinaria pesada trabajando a régimen.

Desde un punto de vista económico, las leguminosas forrajeras contribuyen al desarrollo sostenible de las explotaciones agrarias, puesto que reducen la dependencia de las importaciones proteicas, incrementando la autonomía y el grado de autoabastecimiento en la alimentación del ganado (Atienza y Rubiales, 2017). Asimismo, por ser cultivos fijadores de nitrógeno, requieren menos fertilización y repercuten de forma beneficiosa en el medio ambiente mejorando la calidad del suelo. Además, fomentan la biodiversidad al atraer insectos polinizadores en la época de floración y actúan como fijadores de gases de efecto invernadero (Miguelañez, 2017). Por tanto, la introducción de leguminosas en rotaciones de cultivo aporta servicios ecosistémicos que, de una manera directa o indirecta, contribuyen a mejorar la resiliencia al cambio climático (Peltonen-Sainio y Niemi, 2012).

A pesar de todas estas ventajas, existe una cierta reticencia al uso de estas especies ya que, según algunos autores (Foster *et al.*, 2011), en comparación con las gramíneas, son consideradas más exigentes a la hora de conservarse como ensilado, al ser más susceptibles de sufrir proteólisis en el silo debido a su bajo contenido de azúcares solubles y su alta capacidad tampón. Sin embargo, en el “Capítulo 4” de la presente tesis, se ha demostrado que leguminosas como el haba forrajera y el altramuz blanco presentan mejores índices de ensilabilidad que el raigrás italiano (Baizán *et al.*, 2015). También se ha demostrado en dicho experimento que, el intercultivo leguminosa-raigrás italiano posee mejores condiciones de estabilidad aeróbica en el silo que el raigrás italiano en monocultivo haciendo frente así a dicho problema.

La importancia del cultivo de leguminosas, tanto en monocultivo como en asociación con otras especies, se pone claramente de manifiesto en el RD 980/2017 de 10 de noviembre

de 2018, que modifica los Reales Decretos dictados para la aplicación en España de la Política Agraria Común (PAC) y que recoge, entre otras novedades, el cambio en la condicionalidad, permitiendo la siembra de mezclas de leguminosas y proteaginosas con otros cultivos no fijadores de nitrógeno, siempre que las leguminosas o proteaginosas sean el cultivo predominante, al objeto de que los agricultores puedan seguir beneficiándose del pago verde.

Por todo ello, el objetivo de este experimento ha sido estudiar el comportamiento agronómico y las características nutritivas y fermentativas del haba forrajera en monocultivo o en intercultivo con raigrás italiano, en comparación con el monocultivo de raigrás italiano, con el fin de ser utilizado en las explotaciones agrarias como forraje sostenible adaptado a los requerimientos de la PAC.

5.2. MATERIAL Y MÉTODOS

5.2.1. Localización del ensayo

El ensayo se llevó a cabo en una finca experimental perteneciente al Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA) situada en Villaviciosa (43° 28' 20" N, 5° 26' 10" O, 10 msnm), en la zona costera central de Asturias (Figura 5.1).

5.2.2. Características climáticas y edafológicas del área de estudio

La zona donde se ubica el ensayo, se clasifica como *Cfb* según la clasificación climática de Köppen-Geiger, que corresponde a un clima oceánico. La temperatura media anual es de 14,1°C y la precipitación media anual es de 801 mm (climate-data.org). Las condiciones climáticas dadas durante el período vegetativo de cada uno de los cultivos forrajeros de las rotaciones de los años agronómicos 2014-2015 y 2015-2016 se presentan en la Tabla 5.2 del apartado resultados del presente capítulo.

El experimento se estableció en un suelo de textura franco arenosa (75,76% arena - 13,48% limo - 10,76% arcilla) perteneciente al Orden Mollisoles, Suborden Udoll, Gran Grupo Hapludoll, Subgrupo Fluvéntico (Soil Survey Staff, 2014).

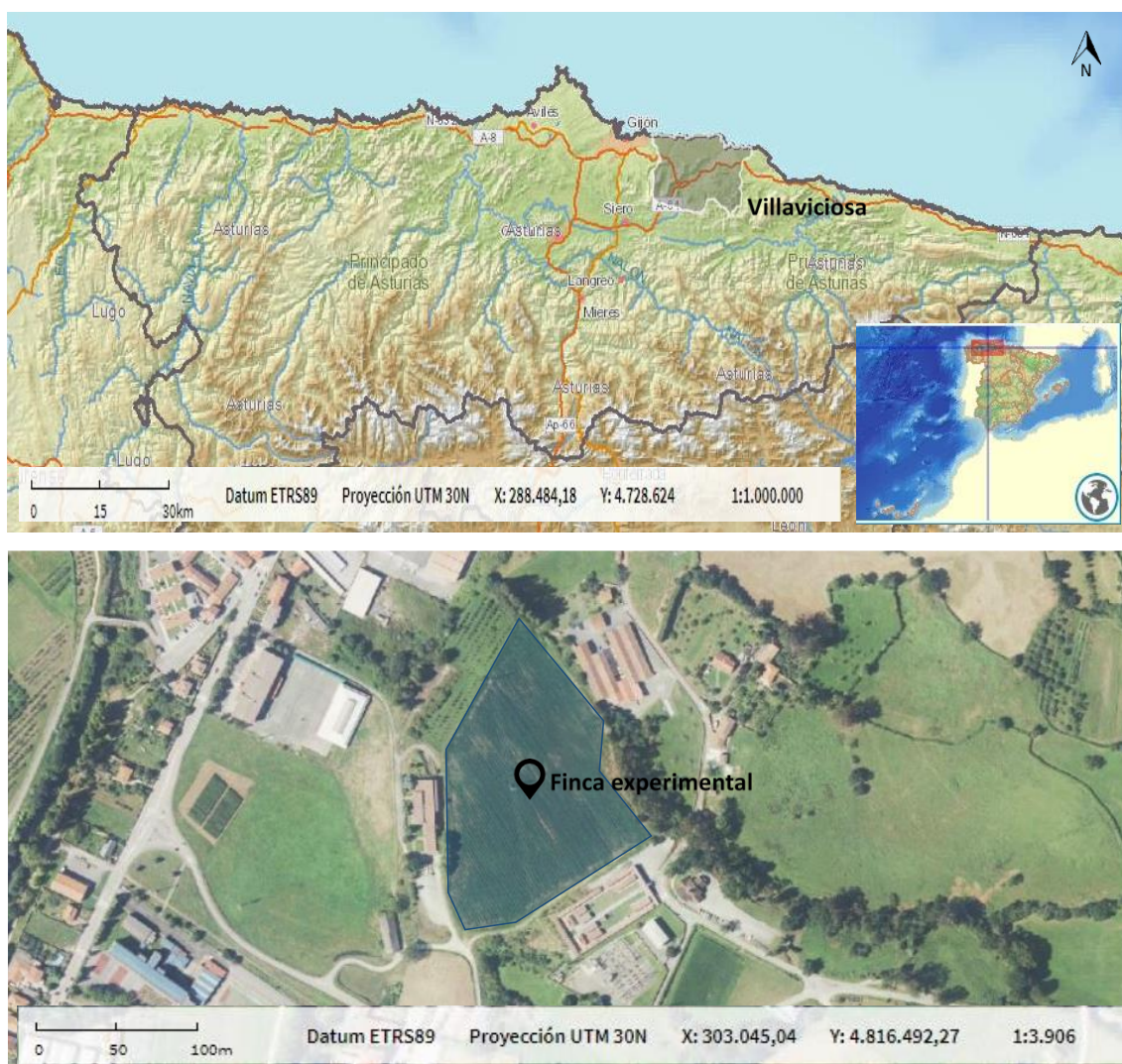


Figura 5.1. Localización de la finca experimental utilizada en el ensayo a nivel de explotación de la presente tesis. Fuente: Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (<http://sig.mapama.gob.es/siga/>).

5.2.3. Material vegetal

Las especies y cultivares (cv.) empleados en el ensayo fueron:

- Raigrás italiano (RI; *Lolium multiflorum* Lam.; ssp. no alternativo; cv. “Barmega” y cv. “Barextra”; comercializados por Barenbrug).
- Haba forrajera (HB; *Vicia faba* L. cv. “Prothabon 101”; comercializado por Semillas Batlle).
- Maíz forrajero (M; *Zea mays* L. cv. “Codigreen” (ciclo FAO 200) comercializado por Codisem).

El haba forrajera y el intercuctivo haba-raigrás fueron seleccionados en función de los resultados obtenidos en el “Capítulo 4” de la presente tesis. La variedad de maíz utilizada, fue seleccionada, de acuerdo a los resultados de la evaluación de variedades comerciales de maíz llevada a cabo por el SERIDA para la zona costera oriental de Asturias, entre las que presentaron una buena adaptación a condiciones difíciles de cultivo, resistencia al encamado y buena calidad forrajera (Martínez-Fernández *et al.*, 2015; Carballal *et al.*, 2016).

5.2.4. Diseño Experimental

Se utilizó una superficie de aproximadamente tres hectáreas en condiciones de secano y dividida en tres subparcelas semejantes y colindantes (Figura 5.2). En una de ellas se realizó un manejo “convencional” con fertilización de síntesis y cultivo invernal de raigrás italiano (RI) para simular el manejo habitual que hacen los ganaderos de la zona. A las otras dos se les aplicó un manejo “alternativo” basado en criterios de sostenibilidad medioambiental y económica utilizando abonado orgánico. Una de estas parcelas fue sembrada con monocultivo de haba forrajera (HB) y la otra con un intercuctivo de HB y RI (HBRI). En todas ellas se utilizó el maíz forrajero como cultivo de verano para completar la rotación. El ensayo se realizó durante dos años agronómicos consecutivos (2014-2015 y 2015-2016), respetando la misma asignación de cultivos en cada subparcela durante los dos años de ensayo.

5.2.5. Manejo aplicado a los cultivos de invierno

5.2.5.1. Laboreo, abonado y dosis de siembra

En toda la parcela se realizó un laboreo mecánico previo a la siembra que consistió en un pase de subsolador cruzado, pase de grada, abonado de fondo y pase cruzado de fresadora.

El abonado de fondo previo a la siembra se realizó en función de los resultados obtenidos en el análisis del suelo, siguiendo las recomendaciones de Martínez-Fernández y Argamentaría-Gutiérrez (2013) para un suelo de fertilidad media (22-35 mg kg⁻¹ de P y 169-336 mg kg⁻¹ de K), incorporando 60 kg ha⁻¹ de N, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 130 kg ha⁻¹ de K₂O. Para la subparcela con RI en manejo convencional, se utilizó un fertilizante inorgánico (abono N-P-K 9-18-27) que fue complementado nitrato amónico cálcico al 27% (NAC 27) y cloruro de potasio al 60% (KCl 60). Además del abonado de fondo, se añadieron 60 UF de nitrato amónico cálcico al 27% (NAC 27) en cobertera después del primer corte para ensilado en primavera. Para las subparcelas con manejo sostenible (HB y HBRI), se utilizó purín de vacuno procedente del rebaño

experimental del SERIDA en dosis equivalentes al abonado inorgánico. En este manejo, no se realizó abonado de cobertera, para aprovechar el potencial de la leguminosa para fijar N.

Las siembras se realizaron a voleo el 20/10/2014 el primer año y el 30/10/2015 el segundo. Las dosis de siembra fueron 150 kg ha⁻¹ para el HB, 50 kg ha⁻¹ para el RI y 75+25 kg ha⁻¹ para HBRI respectivamente.

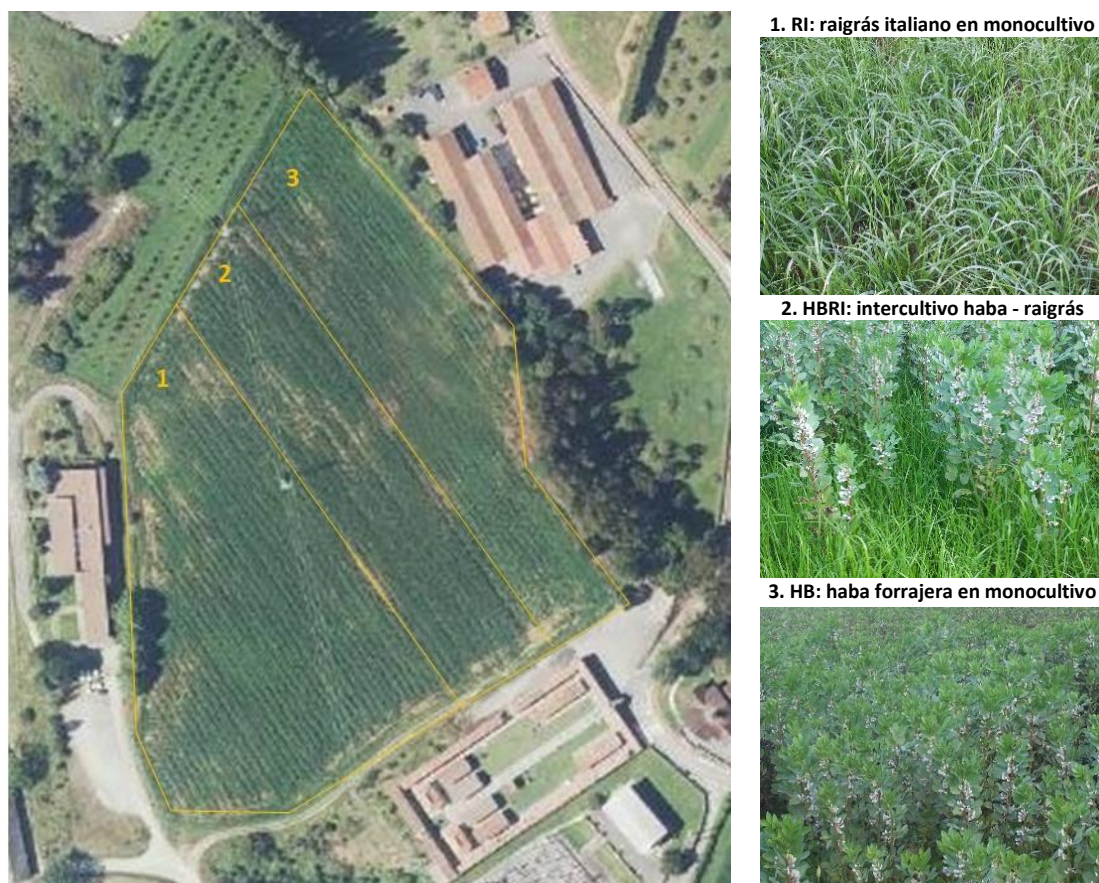


Figura 5.2. Esquema de la distribución de los cultivos forrajeros en las subparcelas. Se repitió la misma asignación cultivo * subparcela los dos años agronómicos de estudio (2014-2015 y 2015-2016). RI: raigrás italiano; HB: haba forrajera y HBRI: intercultivo haba-raigrás.

5.2.5.2. Aprovechamiento de los cultivos de invierno

El raigrás italiano se aprovechó en un sistema de varios cortes, un corte de limpieza o despunte en febrero y dos cortes en primavera. El primer corte de primavera se realizó en estado fenológico de inicio de espigado y el segundo transcurridas entre 5-7 semanas después del primero, siempre en función de las condiciones climáticas del año y de la posibilidad de introducir maquinaria pesada en la parcela. El forraje fue cosechado con segadora de discos y prehenificado sobre el terreno durante 24 horas, trascurridas las cuales se procedió al hilerado,

rotoempacado y encintado utilizando un plástico de 700 galgas de espesor para garantizar las condiciones de anaerobiosis durante el periodo de fermentación y posterior conservación como ensilado.

El monocultivo de haba forrajera y el intercultivo haba-raigrás se aprovecharon en un único corte, cuando las habas se encontraban en estado fenológico de vainas con grano, utilizando una cosechadora autopropulsada. El segundo año, en el intercultivo, las condiciones climáticas propiciaron un rebrote de raigrás que se aprovechó y se tuvo en cuenta en el cómputo de la producción total pero que no se incluyó en los demás análisis. Tras 24 horas de prehenificado, el forraje fue ensilado en silos trinchera de 30 m³ de capacidad el primer año y en forma de rotopacas el segundo. En ambos tipos de ensilado, al igual que con el raigrás, se utilizó un plástico de galga 700.

5.2.5.3. Control de producción

En el momento inmediatamente anterior a la cosecha se realizaron controles de producción de los forrajes con diferente metodología en función del porte del cultivo y de acuerdo con los procedimientos descritos por Martínez-Fernández (1995) y Martínez-Fernández *et al.* (2018). En la subparcela sembrada con RI se utilizó el protocolo para cultivos herbáceos (Fotografía 5.1). Se delimitaron tres zonas de muestreo atendiendo al gradiente de la pendiente, lo suficientemente distanciadas entre sí como para ser consideradas repeticiones. Posteriormente, en cada zona de muestreo, se efectuaron cinco lanzamientos (al azar y en sentido perpendicular a la pendiente) con un listón de aluminio de 2 m de longitud. En cada lanzamiento (punto de muestreo) se segó el forraje a lo largo del mismo empleando unas tijeras cortacésped de 10 cm de anchura de corte (Bosch AGS 70), acumulándose una muestra correspondiente a un área de 1 m² (5 submuestras x 2 m de longitud x 0,10 m de ancho). Este procedimiento se repitió en cada uno de los aprovechamientos (corte de limpieza, primer corte y segundo corte), considerando la producción total de la subparcela la obtenida como sumatorio de los diferentes aprovechamientos.



Fotografía 5.1. Control de producción del cultivo de raigrás italiano. Delimitación de la superficie de muestreo mediante un listón de aluminio (izquierda) e imagen de la zona de muestro tras la toma de muestra (derecha).

En las subparcelas sembradas con HB y HBRI se utilizó el protocolo para cultivos forrajeros de alto porte con siembra a voleo y aprovechamiento en un único corte (Fotografía 5.2). Al igual que en el caso anterior se delimitaron también tres zonas de muestreo. En cada una de ellas se estableció una superficie de muestreo de 1 m² y se segó, con una hoz a la altura del suelo, todo el forraje presente en la misma.

El control de producción del rebrote de raigrás italiano se realizó de la misma forma que en la subparcela sembrada con RI en monocultivo.



Fotografía 5.2. Control de producción del cultivo de haba forrajera. Delimitación del área de muestreo (1 m²) mediante varillas de fibra de vidrio (izquierda) y de la zona de muestro tras la toma de muestra (derecha).

5.2.6. Manejo aplicado al cultivo de verano

5.2.6.1. Laboreo, abonado y dosis de siembra

Tras la cosecha en primavera de los forrajes de invierno, se preparó el terreno para la siembra del maíz forrajero, para lo cual, tras arar el terreno, se efectuaron varios pases de fresadora.

Como en el caso de los forrajes de invierno, el abonado de fondo previo a la siembra se realizó, para cada subparcela, en función de los resultados obtenidos en los análisis del suelo previos. El abonado de la subparcela en manejo convencional, con una fertilidad media (32 mg kg⁻¹ de P y 302 mg kg⁻¹ de K) consistió en el aporte de 125 kg ha⁻¹ de N, 105 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 220 kg ha⁻¹ de K₂O en presiembra y 75 kg ha⁻¹ de N en cobertera utilizando los mismos abonos químicos mencionados anteriormente (complejo 9-18-27, NAC 27 y KCl 60). Las subparcelas en manejo sostenible, con una fertilidad media de P (27 mg kg⁻¹) y baja de K (119 mg kg⁻¹) se fertilizaron con estiércol procedente de la propia explotación previamente analizado para aportar 125 kg ha⁻¹ de N, 105 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 260 kg ha⁻¹ de K₂O. En las subparcelas en manejo sostenible no se aplicó abonado de cobertera.

La siembra del maíz se realizó el 11/06/2015 el primer año y el 11/06/2016 el segundo, con una separación entre líneas de 0,70 m y una distancia entre plantas de 0,15 m. La densidad de siembra final, después de un aclareo, fue de 75.000 semillas por hectárea.

Para el control de la flora arvense se aplicó un herbicida para el control en pre-emergencia y post-emergencia temprana de malas hierbas anuales (Primextra Gold® de Syngenta), y para el control de plagas se utilizó el insecticida Dursban™ 48 (Clorpirifos 48%, Syngenta) a las dosis recomendadas por los fabricantes.

5.2.6.2. Aprovechamiento del cultivo de verano

La cosecha del maíz se realizó a finales de septiembre el primer año y a principios de octubre el segundo (30/09/2015 y 03/10/2016 respectivamente), con el grano en estado pastoso-vítreo (cuando la línea de leche del grano se encuentra entre 1/3 y 1/2 del ápice y las plantas tiene un contenido en MS en torno al 30%). Se utilizó una cosechadora autopropulsada regulada para un tamaño de picado de 1 cm y provista de placa de fricción para aplastamiento

de los granos de maíz. El forraje cosechado se ensiló en silos trinchera de 30 m³ de capacidad utilizando plástico de 700 galgas.

5.2.7. Toma de muestras

5.2.7.1. Muestras de suelo

Al comienzo de los ensayos (septiembre de 2014), se tomaron muestras de suelo para conocer las condiciones edáficas de partida y estimar los requerimientos de abonado necesarios. Posteriormente, se tomaron muestras de suelo, en otras cuatro ocasiones, tras cada cosecha de los forrajes de invierno y de verano (primavera y otoño de 2015 y 2016) para calcular los requerimientos en fertilización de cada año agronómico y evaluar posibles cambios en el tiempo de los parámetros químicos del suelo. El muestreo se realizó en la capa superior del suelo (10-20 cm) en nueve puntos distribuidos al azar, tres dentro de cada subparcela, utilizando una sonda holandesa. Las muestras fueron colocadas en bolsas plásticas con cierre hermético y llevadas al laboratorio para su análisis.

Adicionalmente, con el fin de evaluar el impacto de los dos tipos de manejo (convencional y sostenible) sobre la salud del agroecosistema, se tomaron muestras en dos ocasiones, al inicio y al final del ensayo (otoño de 2014 y 2016) para realizar un diagnóstico de salud del suelo empleando el sistema de “Tarjetas de Salud de los Agroecosistemas Pascícolas-TSAP” desarrollado por Mijangos *et al.* (2012) en el marco del proyecto europeo LIFE “SOILMONTANA” desarrollado por Neiker-Tecnalia.

El muestreo del suelo se realizó, con el maíz en pie, en nueve puntos distribuidos al azar, tres dentro de cada subparcela en función del parámetro a analizar tal y como se describe más adelante en el apartado 5.2.8.2.

Los análisis químicos del suelo se realizaron en el laboratorio del Área de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Oviedo y el diagnóstico de salud fue realizado en el Departamento de Ecología y Recursos Naturales de Neiker-Tecnalia (Vizcaya, País Vasco).

5.2.7.2. Muestras de material vegetal

En los forrajes de invierno, se tomaron muestras del material vegetal cosechado en verde para determinar su contenido en principios nutritivos, contenido energético y perfil de

ácidos grasos. Tras 24 h de prehenificado sobre sobre el terreno, se tomaron muestras para determinar las características de ensilabilidad de dichos forrajes. Tras el periodo de fermentación de estos forrajes, los ensilados obtenidos fueron muestreados para la determinación de principios nutritivos, estimación del aporte energético de cada cultivo, parámetros fermentativos, perfil de ácidos grasos y estabilidad aeróbica. En el caso de los silos trinchera (año 2014-2015), el muestreo se realizó en diferentes puntos de la masa de ensilado y, para las rotopacas (año 2015-2016), en un número de ellas representativo del número total que integró la partida. En ambos casos se utilizó una sonda muestreadora de acero inoxidable con la boca afilada hacia el interior siguiendo la metodología descrita por Martínez-Fernández *et al.*, 2014 y 2016a).

Con respecto al forraje de verano, no se tomaron muestras, ni del forraje verde ni del ensilado, ya que el objetivo de este experimento se centra exclusivamente en caracterizar los forrajes invernales.

5.2.8. Determinaciones analíticas

5.2.8.1. Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo fueron analizadas según la metodología descrita en el apartado 4.2.8.1. del “Capítulo 4” de la presente tesis.

5.2.8.2. Diagnóstico de salud del suelo

El diagnóstico de salud del suelo se realizó mediante las denominadas Tarjetas de Salud de los Agroecosistemas Pascícolas (TSAP) desarrolladas por Neiker-Tecnalia y cuyos protocolos se encuentran descritos en la web del proyecto LIFE10NAT/ES/579 (www.soilmontana.com). Dichas tarjetas contemplan indicadores, “básicos” y “avanzados” en los que se encuentran agrupados los tres servicios que definen la salud de un agroecosistema: “Conservación de la biodiversidad (vegetal y animal)”, “Conservación del recurso suelo” y “Lucha contra el cambio climático” (Tabla 5.1). En esta metodología, cada vez que se mide un indicador, se compara el valor obtenido con los valores de referencia considerados “malos”, “regulares” o “buenos” en las tablas de recogida de datos y se le asigna un valor del 1 al 9. Finalmente, para conocer el estado de cada uno de los servicios se promedian sus indicadores. El diagnóstico global de salud del agroecosistema se obtiene calculando el promedio de los tres servicios, obteniéndose una

nota final entre 1 y 9. En esta escala, se consideran “buenas” las notas entre 7 y 9, “regulares” entre 4 y 6, y “malas” entre 1 y 3.

Tabla 5.1. Indicadores (básicos y avanzados) utilizados para evaluar el estado de los servicios edáficos.

Servicios	1. Conservación de la biodiversidad	2. Conservación del recurso suelo	3. Lucha contra el cambio climático
Indicadores “básicos”	Diversidad de macrofauna	Abundancia de lombrices Tiempo de infiltración	Coloración del suelo
Indicadores “avanzados”	Diversidad de mesofauna Diversidad de bacterias	Respiración basal Respiración inducida Cociente respiratorio Compactación	Emisiones CO ₂

Fuente: adaptada de Mijangos *et al.* (2015).

Para obtener los valores de cada uno de los indicadores mencionados en la Tabla 5.1 se procedió de la siguiente manera:

Diversidad de macrofauna (n°): se extrajeron cuatro bloques cúbicos de suelo de 25 cm de lado y 30 cm de profundidad y se contaron los diferentes tipos (no los individuos) de macrofauna presente.

Abundancia de lombrices (n° m⁻²): se realizó el recuento de las lombrices (individuos) presentes en cada una de los cuatro bloques de suelo extraídos (25x25x30 cm), se sumaron y el resultado se multiplicó por cuatro para hallar el número de lombrices presentes por m².

Tiempo de infiltración (min): se introdujo un cilindro metálico, de 10 cm de diámetro interior y 10 cm de longitud, en el suelo y se vertieron suavemente 235 mL de agua en su interior anotando el tiempo transcurrido (en minutos) hasta su desaparición (Fotografía 5.3).

Coloración del suelo (categoría): se estimó visualmente en función de si la fracción de suelo extraída presentaba una coloración mayoritariamente clara, media u oscura.

Diversidad de mesofauna (índice BQ): se determinó siguiendo el método de extracción de Berlese-Tullgren. Para ello se colocó un fragmento cilíndrico de suelo de 10 cm de diámetro y 5 cm de profundidad sobre un tamiz de 2 mm de malla a su vez colocado sobre un embudo y se aplicó una fuente de luz de 50 W de intensidad a 20 cm de distancia. En el extremo del embudo se colocó un recipiente con alcohol para ir recolectando los organismos transcurridos

siete días. Posteriormente se procedió al recuento de los diferentes tipos de mesofauna presentes (no los individuos) con una lupa.

Diversidad de bacterias (H'): se midió la capacidad de las bacterias del suelo para degradar los 31 sustratos presentes en las microplacas ECO de Biolog™ a 595 nm y se calculó el índice de diversidad funcional de Shannon (H') según el procedimiento descrito por Mijangos *et al.* (2009).

Respiración basal (mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹): se midió la tasa de emisión de CO₂ del suelo durante los tres primeros días de incubación en frascos herméticos a 30°C, en presencia de una solución de NaOH y sin adición de nutrientes externos, según el método ISO 16072 (2002).

Estos parámetros (diversidad de bacterias y respiración basal) se midieron en muestras de suelo compuestas por 10 porciones de suelo superficial mediante una sonda de 10 cm de profundidad y 2,5 cm de diámetro tomadas en cada uno de los tres puntos seleccionados al azar de cada subparcela.

Respiración inducida por sustrato (mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹): tomando los suelos incubados a 30°C durante tres días en la medida anterior (respiración basal), se determinó la tasa de emisión de CO₂ durante las seis primeras horas de incubación (a 30°C y en presencia de una solución de NaOH) inmediatamente después de la adición de una solución nutritiva, consistente en una mezcla de glucosa, KH₂PO₄ y (NH₄)₂SO₄, según el método ISO 17155 (2002).

Cociente respiratorio (qCO₂): se calculó como el cociente de la respiración basal entre la respiración inducida.

Compactación (MPa): es la resistencia que ofrece el suelo a ser penetrado por las raíces y se midió con un penetrómetro digital CP4011 (Rimik, Australia) a lo largo de un perfil de 0 a 75 cm de profundidad (Fotografía 5.3).

Emisión de CO₂: la respiración del suelo se determinó *in situ* mediante una cámara acoplada a un analizador de gases en infrarrojo (SCR-1 e IRGA EGM-4, PP Systems) que registra la concentración (Fotografía 5.3).



Fotografía 5.3. Material utilizado para la medida del tiempo de infiltración (izquierda), compactación (centro) y emisión de CO₂ (derecha) del suelo según los protocolos descritos en las Tarjetas de Salud de los Agroecosistemas Pascícolas (TSAP).

5.2.8.3. Forrajes

Los forrajes, tanto en verde, como prehenificados y conservados mediante ensilado, fueron analizados en el laboratorio de Nutrición Animal del SERIDA, acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) y conforme a los criterios recogidos en la norma UNE-EN-ISO/IEC 17025 (N° de expediente LE/930). El análisis del RI se realizó solamente en las muestras del primer corte al ser el corte de mejor calidad nutritiva y estar previsto para ser utilizado en los ensayos de alimentación del “Capítulo 6”. La metodología utilizada se describe en el apartado 4.2.8.2. del “Capítulo 4” de la presente tesis.

5.2.9. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el software estadístico de libre acceso R (R Core Team, 2017). Todos los resultados obtenidos fueron contrastados mediante análisis de varianza (ANOVA) considerando el manejo (cultivo forrajero y tipo de fertilización) como factor principal y el año como factor aleatorio. Además, se llevó a cabo un test de comparación de medias de Duncan para comparar las alternativas forrajeras entre sí para un nivel de significación de $p < 0,05$.

5.3. RESULTADOS

5.3.1. Condiciones termopluiométricas

Los datos climáticos fueron extraídos de la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio (Tabla 5.2). Se observó que el régimen térmico fue muy poco variable entre años, con promedios generales muy similares que solo difieren alrededor de una décima de grado un año respecto a otro. La temperatura media de los meses en los que estuvieron implantados los forrajes de invierno fue de 12,0°C, con una media de las mínimas de 8,5°C y una media de las máximas de 15,6°C. Durante los meses que estuvo implantado el cultivo de verano, la temperatura media fue de 18,4°C, con una media de las mínimas de 15,1°C y una media de las máximas de 21,8°C.

En el régimen pluviométrico se observaron ligeras variaciones de un año respecto a otro. De forma conjunta, el segundo año agronómico (2015-2016) fue algo más lluvioso que el primero (2014-2015), registrando un total de 1192 mm frente a 1115 mm en menos días de lluvia (137 vs. 165). La precipitación media durante los meses de invierno fue similar entre años en cantidad de lluvia caída, pero la precipitación media de los meses de verano del segundo año fue de 101 mm mayor con tres días de lluvia menos.

Tabla 5.2. Condiciones climáticas durante los periodos vegetativos de los cultivos forrajeros de invierno y verano en los años agronómicos 2014-2015 y 2015-2016.

<i>Año agronómico</i>	<i>2014-2015</i>		<i>2015-2016</i>	
	<i>Invierno</i>	<i>Verano</i>	<i>Invierno</i>	<i>Verano</i>
<i>Período vegetativo de los cultivos</i>				
Período considerado	20-10-14 25-05-15	11-06-15 30-09-15	30-10-15 30-05-16	11-06-16 03-10-16
Días de cultivo	218	112	214	115
Temperatura mínima (°C)	8,4	14,9	8,6	15,3
Temperatura máxima (°C)	15,1	21,8	16,1	21,7
Temperatura media (°C)	11,7	18,3	12,3	18,5
Días de lluvia	129	36	104	33
Precipitación acumulada (mm)	945	170	921	271

Fuente: elaboración propia a partir de datos proporcionados por AEMET (<https://datosclima.es/>) de la estación meteorológica más próxima al área de estudio situada en Colunga (Asturias, España).

5.3.2. Forrajes verdes

En la Figura 5.3 se muestra el rendimiento medio en materia seca (kg MS ha⁻¹) de los forrajes de invierno en los dos años agronómicos de estudio (2014-2015 y 2015-2016). El cultivo

más productivo fue el HBRI con una producción media de forraje de 9206 kg MS ha⁻¹ frente a 7241 y 5730 kg MS ha⁻¹ para HB y RI respectivamente.

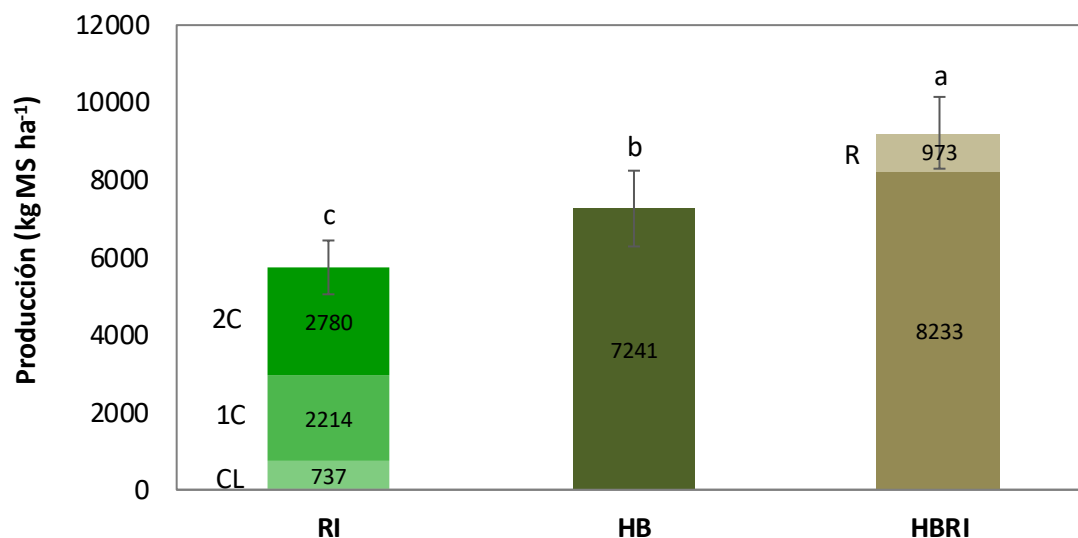


Figura 5.3. Producción forrajera (kg MS ha⁻¹) de los forrajes de invierno: raigrás italiano (RI), haba forrajera (HB) e intercultivo haba-raigrás (HBRI) durante los dos años agronómicos de estudio (2014-2015 y 2015-2016). CL: corte de limpieza; 1C: primer corte; 2C: segundo corte; R: rebrote de RI. Letras distintas indican diferencias significativas entre tipo de forraje en el test de comparación de medias de Duncan ($p < 0,05$).

En la Tabla 5.3 se detallan los resultados de valor nutritivo, aporte energético y perfil de ácidos grasos de los forrajes verdes de invierno y los parámetros de ensilabilidad tras su prehenificado. Como ya se ha comentado en el apartado de material y métodos (5.2.8.3.), para la estimación del valor nutritivo, contenido energético, ensilabilidad y perfil de ácidos grasos de RI, tanto en forraje verde, prehenificado, como en ensilado, solo se consideró el primer corte (1C) por ser el de mejor calidad y el que formará parte de las raciones elaboradas para los ensayos de alimentación (Capítulo 6).

Al contrario de lo esperado, no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de PB entre los cultivos con leguminosa (HB y HBRI) y el RI. Los contenidos en fibras (FAD y FND), fueron más elevados ($p < 0,001$) en los cultivos de HB y HBRI que en RI. El efecto de estas diferencias en la fracción de fibra se ve reflejado en un porcentaje de digestibilidad y un contenido energético más bajo en estos forrajes que los obtenidos en RI ($p < 0,001$).

Tabla 5.3. Valor nutritivo, aporte energético y perfil de ácidos grasos de los forrajes verdes de invierno y parámetros de ensilabilidad tras su prehenificado.

	RI (1C)	HB	HBRI	eer	p (M)	p (A)	p (MxA)
Valor nutritivo y aporte energético							
Materia seca (MS)	15,05 ^b	17,92 ^a	15,40 ^b	1,698	0,024	0,003	0,007
Materia orgánica (MO)	91,97	91,95	91,58	0,805	0,647	<0,001	0,719
Proteína bruta (PB)	12,41	11,73	13,49	1,953	0,325	0,049	0,013
Fibra neutro detergente (FND)	39,18 ^b	54,60 ^a	51,60 ^a	3,511	<0,001	0,001	0,947
Fibra ácido detergente (FAD)	17,30 ^b	34,24 ^a	29,81 ^a	3,666	<0,001	0,002	0,347
Digestibilidad de la MO <i>in vivo</i> (Dvivo)	83,53 ^a	52,76 ^c	65,41 ^b	1,459	<0,001	0,013	0,624
Energía metabolizable (EM)	12,29 ^a	7,77 ^c	9,59 ^b	0,258	<0,001	0,002	0,424
Ácidos grasos (AG)							
Caprílico (C8:0)	0,10	0,12	0,11	0,033	0,407	0,017	0,364
Cáprico (C10:0)	0,01	0,02	0,02	0,012	0,442	0,328	0,752
Láurico (C12:0)	0,87	1,12	0,97	0,382	0,533	0,041	0,197
Mirístico (C14:0)	0,37	0,40	0,39	0,098	0,919	0,011	0,246
Pentadecanoico (C15:0)	0,12 ^b	0,24 ^a	0,19 ^a	0,050	0,005	0,676	0,463
Palmítico (C:16:0)	16,74	18,08	17,41	2,162	0,578	0,051	0,497
Palmitoleico (C16:1 <i>cis</i> -9)	0,06	0,44	0,17	0,304	0,131	0,028	0,124
Heptadecanoico (C17:0)	0,07 ^b	0,23 ^a	0,15 ^{ab}	0,066	0,006	0,249	0,940
Esteárico (C18:0)	0,71 ^c	2,24 ^a	1,40 ^b	0,288	<0,001	0,048	0,602
Oleico (C18:1 <i>cis</i> -9)	1,87 ^b	5,60 ^a	2,26 ^b	1,892	0,009	0,019	0,048
Vaccénico (C18:1 <i>cis</i> -11)	0,23 ^b	0,65 ^a	0,36 ^b	0,166	0,003	<0,001	0,004
Linoleico (C18:2 <i>cis</i> -9 <i>cis</i> -12)	13,51 ^c	38,69 ^a	27,58 ^b	4,002	<0,001	0,159	0,826
Linolénico (C18:3 <i>cis</i> -9 <i>cis</i> -12 <i>cis</i> -15)	65,26 ^a	31,87 ^c	48,81 ^b	3,987	<0,001	<0,001	0,548
Araquídico (C20:0)	0,06 ^c	0,31 ^a	0,20 ^b	0,049	<0,001	<0,001	0,143
Behénico (C22:0)	0,02	0,02	<LC	0,015	0,039	0,002	0,039
Σ Saturados	19,08 ^b	22,76 ^a	20,84 ^{ab}	2,242	0,045	0,010	0,756
Σ Insaturados	80,93 ^a	77,24 ^b	79,17 ^{ab}	2,242	0,045	0,010	0,756
Ensilabilidad							
Materia seca prehenificada (MSp)	18,02 ^b	21,15 ^a	20,08 ^{ab}	2,047	0,059	<0,001	0,133
Azúcares solubles (AZSOL)	29,89 ^a	10,97 ^c	15,64 ^b	2,828	<0,001	<0,001	<0,001
Capacidad tampón (CT)	33,42 ^a	20,30 ^c	24,77 ^b	3,303	<0,001	0,001	0,052
Índice de ensilabilidad (IE)	15	44	33				

RI (1C): raigrás italiano de primer corte; HB: haba forrajera; HBRI: intercultivo HBRI; MS (%); MO (% MS); PB (% MS); FAD (% MS); FND (% MS); Dvivo (%); EM (MJ kg MS⁻¹); AG (g 100 g⁻¹ AG); MSp (%); AZSOL (% MS); CT (meq NaOH 100 g⁻¹ MS); IE (según Martínez-Fernández *et al.*, 2013; alta: IE> 28; media-alta: 9<IE≤28; media: -28<IE≤9; media-baja: -47≤IE-28; baja: IE<-47); eer: error estándar residual; M: manejo (cultivo x fertilización); A: año.

^{a,b,c} Letras distintas indican diferencias significativas entre los forrajes ensayados según el test de comparación de medias de Duncan (p<0,05).

Los valores corresponden a la media de los dos años agronómicos de estudio (2014-2015 y 2015-2016).

Los AG mayoritarios presentes en los forrajes verdes fueron el ácido palmítico (C16:0), oleico (C18:1 *cis*-9), linoleico (C18:2 *cis*-9 *cis*-12) y linolénico (C18:3 *cis*-9 *cis*-12 *cis*-15), constituyendo cerca del 95% del total (Tabla 5.3). El AG predominante en HB fue el linoleico

mientras que en RI y HBRI fue el linolénico. No se observaron diferencias significativas entre forrajes para el ácido palmítico, principal AG saturado, pero el sumatorio total de saturados fue menor en RI que en HB ($p < 0,05$). El ácido oleico fue más elevado en la leguminosa en monocultivo (HB), con un valor de $5,60 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ vs. $1,87$ y $2,26 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ en RI y HB respectivamente ($p < 0,001$). Los ácidos linoleico y linolénico presentaron diferencias entre forrajes siendo el HB el forraje con mayor contenido de linoleico ($p < 0,001$) y el RI el de mayor contenido de linolénico ($p < 0,001$). En el sumatorio total de insaturados se observaron diferencias significativas entre RI y HB ($p < 0,05$) mientras que HBRI presentó valores intermedios sin diferencias con los otros forrajes.

Se observaron diferencias significativas ($p < 0,001$) entre forrajes en el contenido de AZSOL a favor del RI, mientras que los mejores valores de CT correspondieron a HB ($p < 0,001$). Considerando en conjunto los parámetros que definen la ensilabilidad (IE), los mejores valores fueron para la leguminosa, tanto en monocultivo como en intercultivo (HBRI), con una alta ensilabilidad ($IE > 28$) frente a la ensilabilidad media-alta ($9 < IE \leq 28$) del RI.

5.3.3. Ensilados

En la Tabla 5.4 se detallan los resultados de valor nutritivo, aporte energético, parámetros fermentativos y perfil de ácidos grasos de los ensilados de los forrajes de invierno ensayados. Se observaron resultados similares a los obtenidos en forraje de partida, sin diferencias significativas en el contenido de PB, pero con diferencias ($p < 0,001$) en los contenidos en fibras en HB y HBRI que hicieron que la digestibilidad y la energía metabolizable del RI fuera mayor que la de los otros dos forrajes ($p < 0,001$).

De los parámetros fermentativos, cabe destacar el elevado valor de pH y el contenido BUT presente en el ensilado de HBRI ($p < 0,05$). En los ácidos grasos volátiles totales, considerados como el sumatorio de ACE + PRO + BUT, los mejores resultados fueron observados en el ensilado de HB, aunque presentó menor contenido ($p < 0,05$) en LAC que en el ensilado de RI.

Tabla 5.4. Valor nutritivo, aporte energético, parámetros fermentativos y perfil de ácidos grasos del ensilado de los forrajes de invierno ensayados.

	RI (1C)	HB	HBRI	eer	p(M)	P(A)	P(MxA)
Valor nutritivo y aporte energético							
Materia seca (MS)	16,54 ^b	28,94 ^a	18,04 ^b	1,262	<0,001	0,002	0,736
Materia orgánica (MO)	88,11	86,60	87,74	2,168	0,477	0,010	0,772
Proteína bruta (PB)	13,08	13,95	12,64	0,878	0,065	<0,001	0,011
Fibra neutro detergente (FND)	49,30 ^b	61,56 ^a	61,70 ^a	2,833	<0,001	0,289	0,258
Fibra ácido detergente (FAD)	31,20 ^b	43,79 ^a	42,01 ^a	2,779	<0,001	0,053	0,026
Digestibilidad de la MO <i>in vivo</i> (Dvivo)	83,28 ^a	59,25 ^b	61,64 ^b	2,616	<0,001	0,201	0,160
Energía metabolizable (EM)	11,72 ^a	8,20 ^b	8,64 ^b	0,447	<0,001	0,025	0,258
Parámetros fermentativos							
pH	4,10 ^b	4,43 ^{ab}	4,58 ^a	0,266	0,023	0,445	0,005
N amoniacal (N-NH ₃)	8,99	12,41	18,20	6,116	0,064	0,787	0,178
Ácido láctico (LAC)	6,28 ^a	3,03 ^b	2,67 ^b	1,876	0,011	0,933	0,166
Ácido acético (ACE)	5,48 ^a	2,14 ^b	4,66 ^a	1,430	0,004	0,026	0,049
Ácido propiónico (PRO)	0,23	0,17	0,25	0,155	0,627	0,052	0,523
Ácido butírico (BUT)	1,05 ^b	0,87 ^b	3,23 ^a	1,568	0,041	0,442	0,476
Ácidos grasos (AG)							
Caproico (C6:0)	0,52	2,13	2,35	1,553	0,154	0,425	0,108
Heptanoico/Enántico (C7:0)	0,01	0,02	0,04	0,043	0,526	0,135	0,526
Caprílico (C8:0)	0,07 ^b	0,19 ^a	0,16 ^a	0,055	0,009	0,001	0,160
Cáprico (C10:0)	0,02 ^b	0,07 ^a	0,06 ^a	0,011	<0,001	0,004	0,145
Láurico (C12:0)	4,95	2,63	5,79	2,770	0,209	<0,001	0,231
Mirístico (C14:0)	0,55 ^b	0,87 ^a	0,83 ^a	0,084	<0,001	0,264	0,011
Pentadecanoico (C15:0)	0,11 ^c	0,32 ^a	0,22 ^b	0,023	<0,001	0,537	0,241
Palmítico (C:16:0)	17,37 ^b	24,27 ^a	23,15 ^a	1,453	<0,001	0,093	0,001
Palmitoleico (C16:1 <i>cis</i> -9)	0,17 ^c	0,54 ^a	0,37 ^b	0,078	<0,001	<0,001	<0,001
Heptadecanoico (C17:0)	0,10	0,37	0,22	0,014	<0,001	<0,001	<0,001
Esteárico (C18:0)	0,92 ^c	3,00 ^a	1,94 ^b	0,086	<0,001	<0,001	<0,001
Oleico (C18:1 <i>cis</i> -9)	1,54 ^c	4,35 ^a	2,50 ^b	0,506	<0,001	<0,001	<0,001
Vaccénico (C18:1 <i>cis</i> -11)	0,42 ^b	0,94 ^a	0,67 ^{ab}	0,237	0,012	0,001	0,018
Linoleico (C18:2 <i>cis</i> -9 <i>cis</i> -12)	12,64 ^c	35,85 ^a	23,35 ^b	0,801	<0,001	<0,001	0,118
Linolénico (C18:3 <i>cis</i> -9 <i>cis</i> -12 <i>cis</i> -15)	60,43 ^a	24,06 ^b	37,99 ^b	1,78	<0,001	<0,001	0,055
Araquídico (C20:0)	0,09 ^c	0,40 ^a	0,29 ^b	0,045	<0,001	<0,001	0,018
Behénico (C22:0)	0,11 ^a	0,04 ^b	0,10 ^a	0,029	0,003	0,016	0,079
Σ Saturados	24,81 ^b	34,28 ^a	35,13 ^a	1,934	<0,001	<0,001	0,364
Σ Insaturados	75,19 ^a	65,73 ^b	64,87 ^b	1,934	<0,001	<0,001	0,364

RI (1C): raigrás italiano de primer corte; HB: haba forrajera; HBRI: intercultivo HBRI; MS (%); CEN (% MS); MO (% MS); PB (% MS); FAD (% MS); FND (% MS); DEMO (%); Dvivo (%); EM (MJ kg MS⁻¹); N-NH₃ (% N total); LAC (% MS); ACE (% MS); PRO (% MS); BUT (% MS); AG (g 100 g⁻¹ AG); eer: error estándar residual; M: manejo (cultivo y fertilización); A: año.

^{a,b,c} Letras distintas indican diferencias significativas entre los forrajes ensayados según el test de comparación de medias de Duncan (p<0,05).

Los valores corresponden a la media de los dos años agronómicos de estudio (2014-2015 y 2015-2016).

Al contrario que lo observado para forraje verde, en los ensilados resultantes, se observaron diferencias significativas ($p < 0,001$) en el contenido en ácido palmítico, con un contenido inferior en RI respecto a HB y HBRI. De nuevo el HB fue el forraje con mayor contenido de ácido oleico ($p < 0,001$) y los ácidos linoleico y linolénico presentaron diferencias entre forrajes ($p < 0,001$) siendo el HB el forraje con mayor contenido de linoleico y el RI el de mayor contenido de linolénico. En el sumatorio de saturados e insaturados se observaron diferencias significativas ($p < 0,001$) entre RI y los otros forrajes.

En la Figura 5.4 se observan los cambios de estabilidad aeróbica en función de la evolución de los valores de pH y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) durante los diez días posteriores a la apertura de los ensilados expuestos a temperatura ambiente.

Todos los forrajes mostraron un incremento notable en su temperatura durante los tres primeros días de exposición hasta igualar la temperatura ambiente, permaneciendo estables hasta el sexto día de apertura. Al cuarto día de exposición, el ensilado de HB parece estabilizarse mientras que las temperaturas del HBRI y del RI se siguen incrementando progresivamente, sobretodo la del RI.

En la variación de pH, se observó que el ensilado de HB permanece constante durante los diez días de apertura. El ensilado de HBRI comienza a incrementar su valor de pH a partir del séptimo día de exposición a temperatura ambiente, pero lo hace de una forma gradual mientras que el pH de RI se incrementa de forma acusada a partir del noveno día.

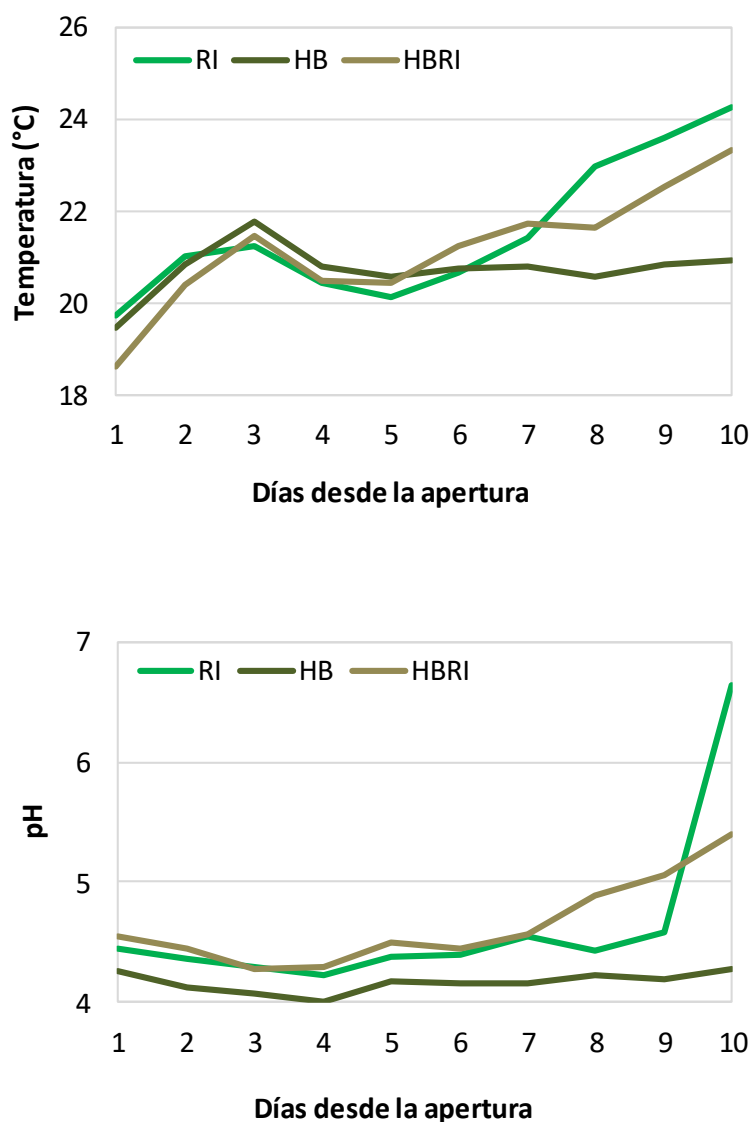


Figura 5.4. Estabilidad aeróbica (variación de temperatura en °C y pH) de los ensilados de raigrás italiano (RI), haba forrajera (HB) e intercultivo de haba-raigrás (HBRI) tras la apertura y exposición a la temperatura ambiente durante un período de 10 días. Datos obtenidos en cámara de estabilidad aeróbica a temperatura ambiente controlada ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) durante el período de exposición.

5.3.4. Suelo

Las propiedades químicas del suelo de las subparcelas del ensayo se muestran en la Tabla 5.5. Los valores de pH de los suelos de las subparcelas con manejo alternativo fueron superiores ($p < 0,001$) que el registrado en la subparcela con manejo convencional. No se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre manejos en los valores de los parámetros de CE, MOS, C, Na, Al y Al_{CICE} . Las subparcela HBRI presentó contenidos más altos ($p < 0,05$) en la relación C/N, Ca, Mg, K, CICE y P que los obtenidos en RI. Los resultados para estos parámetros registrados en la parcela HB fueron estadísticamente iguales a los otros dos manejos excepto en

K, en el que todos los manejos fueron significativamente diferentes ($p < 0,001$). El contenido en N de la parcela RI fue superior ($p < 0,05$) que en las parcelas con leguminosa.

Tabla 5.5. Propiedades químicas del suelo de las subparcelas objeto de estudio.

	RI	HB	HBRI	eer	p (M)	p (A)	p(MxA)
pH	6,18 ^b	7,16 ^a	7,07 ^a	0,562	<0,001	0,574	0,267
CE ($ds\ m^{-1}$)	0,06	0,09	0,07	0,034	0,130	<0,001	0,050
MOS (%)	5,17	5,25	5,38	0,567	0,599	<0,001	0,158
C (%)	3,00	3,04	3,12	0,328	0,597	<0,001	0,155
N (%)	0,21 ^a	0,18 ^b	0,18 ^b	0,033	0,031	0,294	0,044
C/N	14,89 ^b	17,48 ^{ab}	18,29 ^a	3,566	0,036	<0,001	0,131
Ca ($cmol^{(+)}\ kg^{-1}$)	11,42 ^b	12,04 ^{ab}	12,74 ^a	1,111	0,011	<0,001	0,024
Mg ($cmol^{(+)}\ kg^{-1}$)	0,61 ^b	0,69 ^{ab}	0,76 ^a	0,132	0,015	<0,001	0,004
K ($cmol^{(+)}\ kg^{-1}$)	0,24 ^c	0,42 ^a	0,30 ^b	0,060	<0,001	<0,001	<0,001
Na ($cmol^{(+)}\ kg^{-1}$)	0,91	0,94	0,89	0,252	0,890	0,094	0,981
Al ($cmol^{(+)}\ kg^{-1}$)	0,01	0,01	0,02	0,022	0,246	<0,001	0,210
CICE ($cmol^{(+)}\ kg^{-1}$)	13,19 ^b	14,10 ^{ab}	14,72 ^a	1,213	0,006	<0,001	0,010
Al_{CICE} (%)	0,06	0,04	0,10	0,115	0,336	<0,001	0,372
P ($mg\ kg^{-1}$)	17,86 ^b	20,94 ^{ab}	23,84 ^a	4,084	0,002	<0,001	0,147

RI: subparcela con manejo convencional (cultivo de raigrás italiano y fertilización química); HB: subparcela con manejo alternativo (cultivo de haba forrajera y fertilización orgánica) y HBRI: subparcela con manejo alternativo (intercultivo de haba-raigrás y fertilización orgánica).

CE: conductividad eléctrica; MOS: materia orgánica del suelo; CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva; Al_{CICE}: Al en el complejo de cambio; eer: error estándar residual; M: manejo (cultivo y fertilización); A: año.

^{a,b,c} Letras distintas indican diferencias significativas entre los forrajes ensayados según el test de comparación de medias de Duncan ($p > 0,05$).

Los datos se presentan como la media de 5 muestreos realizados durante los dos años agronómicos de estudio (2014-2015 y 2015-2016).

En las Tablas 5.6 y 5.7 se muestran los resultados de los indicadores analizados para realizar un diagnóstico “básico” y “avanzado” del estado de los servicios edáficos principales de las subparcelas de ensayo: una de ellas bajo manejo convencional (tras la rotación del cultivo de RI - maíz forrajero con fertilización química) y las otras dos bajo manejo alternativo (tras las rotaciones de HB y HBRI - maíz forrajero con fertilización orgánica).

En el diagnóstico nivel básico (Tabla 5.6), los indicadores de los servicios “Conservación de la Biodiversidad” (macrofauna) y “Lucha contra el Cambio Climático” (coloración del suelo), no presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre manejos. Sin embargo, los indicadores del servicio “Conservación del recurso Suelo” (abundancia de lombrices y tiempo de infiltración), fueron más favorables en las subparcelas cultivadas con HB y HBRI y abonadas con fertilización orgánica que en la subparcela cultivada con RI y abonada con fertilización química. Aunque la abundancia de lombrices fue notablemente superior en las parcelas bajo manejo alternativo (HB, HBRI, $p < 0,001$), las notas obtenidas no fueron muy elevadas, ya que según la escala de

referencia de las TSAP se consideran “regulares” las notas entre 4 y 6. El tiempo de infiltración fue significativamente más bajo en las parcelas con manejo alternativo (2,08 y 0,90 vs. 13,90 minutos para HB, HBRI y RI respectivamente, ($p < 0,05$) obteniéndose notas consideradas “buenas” frente a la calificación “regular” de la subparcela con manejo convencional. Por tanto, el diagnóstico global básico indicó que la salud general de los suelos bajo manejo alternativo fue mejor ($p < 0,001$) que la del suelo bajo manejo convencional con unas notas finales de 5,72 y 5,85 vs. 4,50 para HB, HBRI y RI respectivamente.

Con el diagnóstico avanzado (Tabla 5.7), en el servicio “Conservación de la Biodiversidad”, la mesofauna (tamaño comprendido entre 0,1 y 1 mm) presentó diferencias significativas ($p < 0,001$) entre los tres manejos siendo la parcela HBRI la que obtuvo valores de diversidad más elevados. La diversidad en bacterias fue diferente entre manejo convencional y alternativo, pero igual para las subparcelas HB y HBRI. En cualquier caso, independientemente de las diferencias entre tratamientos, las notas de ambos indicadores resultaron relativamente bajas al comparar sus valores de diversidad con las referencias indicadas en las TSAP. En la “Conservación del Recurso Suelo”, los resultados de respiración basal e inducida en las subparcelas con manejo alternativo fueron superiores ($p < 0,001$) que los de la subparcela bajo manejo convencional obteniéndose notas consideradas buenas según los valores de referencia. Por otra parte, aunque la respiración inducida fue significativamente superior en las subparcelas con manejo alternativo, el cociente respiratorio (respiración basal/reparación inducida) no presentó diferencias significativas. Los valores de compactación observados están de acuerdo con los resultados de infiltración obtenidos en el diagnóstico básico, siendo más favorables en las subparcelas manejadas alternativamente. Al contrario que en el resto de parámetros analizados, las emisiones de CO_2 medidas en campo fueron más bajas en la parcela con manejo convencional ($p < 0,001$), obteniendo, por tanto, una nota mejor en el servicio “Lucha contra el cambio climático”. Teniendo en cuenta el promedio de todos los servicios analizados, el diagnóstico global avanzado de salud del agroecosistema fue mejor en la subparcelas con manejo alternativo, aunque solo la subparcela HBRI presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) respecto al manejo convencional.

Tabla 5.6. Diagnóstico “básico” de los servicios edáficos principales, según las Tarjetas de Salud de los Agrosistemas Pascícolas (TSAP).

Servicio	Indicador	RI		HB		HBRI		eer	p (M)	p(A)	p (MxA)
		Valor	Nota (1-9)	Valor	Nota (1-9)	Valor	Nota (1-9)				
Conservación de la Biodiversidad	Diversidad de macrofauna (n°)	2,33	3,28	2,83	3,72	3,17	4,02	0,682	0,213	<0,001	0,467
Conservación del Recurso Suelo	Abundancia de lombrices (n° m ⁻²)	2,67	1,47 ^b	50,67	5,03 ^a	48,00	5,25 ^a	1,068	<0,001	<0,001	0,099
	Tiempo de infiltración (min)	13,90	6,52 ^b	2,08	8,40 ^a	0,90	8,73 ^a	0,887	0,002	0,001	0,003
Lucha contra el Cambio Climático	Coloración del suelo (color)	6,17	6,17	6,67	6,67	6,58	6,58	0,425	0,134	0,422	0,797
Diagnóstico Global BÁSICO	Promedio de los servicios		4,50^b		5,72^a		5,85^a	0,420	<0,001	0,387	0,942

RI: subparcela con manejo convencional (cultivo de raigrás italiano y fertilización química); HB: subparcela con manejo alternativo (cultivo de haba forrajera y fertilización orgánica) y HBRI: subparcela con manejo alternativo (intercultivo de haba-raigrás y fertilización orgánica); eer: error estándar residual; M: manejo (cultivo y fertilización); A: año.

^{a,b,c} Letras distintas indican diferencias significativas entre los forrajes ensayados según el test de comparación de medias de Duncan ($p > 0,05$).

En una escala de 1 a 9, se consideran “buenas” las notas entre 7 y 9, “regulares” entre 4 y 6, y “malas” entre 1 y 3. Las notas se obtienen al comparar los datos obtenidos con los valores de referencia establecidos en las TSAP.

Los datos se presentan como la media de los dos muestreos realizados al principio (otoño 2014) y al final (otoño 2016) del período de ensayo.

Tabla 5.7. Diagnóstico “avanzado” de los servicios edáficos principales, según las Tarjetas de Salud de los Agrosistemas Pascícolas (TSAP).

Servicio	Indicador	RI		HB		HBRI		eer	p (M)	p(A)	p (MxA)
		Valor	Nota (1-9)	Valor	Nota (1-9)	Valor	Nota (1-9)				
Conservación de la Biodiversidad	Diversidad de mesofauna (BQ)	38,48	3,87 ^c	48,07	4,52 ^b	58,57	5,22 ^a	0,361	<0,001	0,001	0,019
	Diversidad de bacterias (H')	2,95	3,93 ^b	3,52	5,05 ^a	3,88	5,78 ^a	0,660	0,001	<0,001	0,104
Conservación del Recurso Suelo	Respiración basal mg (C kg ⁻¹ h ⁻¹)	1,17	6,82 ^b	1,92	8,62 ^a	2,00	8,78 ^a	0,514	<0,001	0,002	0,128
	Respiración inducida mg (C kg ⁻¹ h ⁻¹)	5,25	2,58 ^b	8,02	3,43 ^a	7,90	3,37 ^a	0,258	<0,001	<0,001	0,158
	Cociente respiratorio (qCO ₂)	0,23	1,00	0,25	1,00	0,27	1,00	<0,001	0,397	0,337	0,397
	Compactación (MPa)	2131,68	5,75 ^b	1625,08	6,68 ^a	1658,72	6,73 ^a	0,698	0,053	0,058	0,004
Lucha contra el Cambio Climático	Emisiones de CO ₂ (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	0,52	7,98 ^a	0,94	7,13 ^b	1,28	6,52 ^b	0,493	<0,001	0,358	0,130
Diagnóstico Global AVANZADO	Promedio de los servicios		5,18^b		5,53^{ab}		5,70^a				

RI: subparcela con manejo convencional (cultivo de raigrás italiano y fertilización química); HB: subparcela con manejo alternativo (cultivo de haba forrajera y fertilización orgánica) y HBRI: subparcela con manejo alternativo (intercultivo de haba-raigrás y fertilización orgánica); BQ: índice de Calidad Biológica; H': índice de diversidad funcional de Shannon; qCO₂: cociente metabólico; eer: error estándar residual; M: manejo (cultivo y fertilización); A: año.

^{a,b,c} Letras distintas indican diferencias significativas entre los forrajes ensayados según el test de comparación de medias de Duncan (p>0,05).

En una escala de 1 a 9, se consideran “buenas” las notas entre 7 y 9, “regulares” entre 4 y 6, y “malas” entre 1 y 3. Las notas se obtienen al comparar los datos obtenidos con los valores de referencia establecidos en las TSAP.

Los datos se presentan como la media de los dos muestreos realizados al principio (otoño 2014) y al final (otoño 2016) del período de ensayo.

Con el fin de comparar los análisis químicos del suelo con las TSAP, se seleccionaron los principales indicadores químicos y biológicos y se representaron en gráficos “radiales” o gráficos de araña (Figura 5.5).

En los indicadores químicos, el K y N fueron los que presentaron menos equilibrio, aunque en el caso del K se observa una tendencia de separación entre tratamientos.

En los indicadores biológicos, los indicadores principales fueron la abundancia de lombrices y de mesofauna y el indicador de menos equilibrio fue el cociente respiratorio.

Estos gráficos muestran cómo los indicadores biológicos son capaces de diferenciar los tratamientos (manejo convencional del manejo alternativo) gracias a su mayor rapidez de respuesta y sensibilidad, mientras que en los indicadores químicos tradicionales los tratamientos se solapan, lo cual indica que necesitan un mayor tiempo de respuesta.

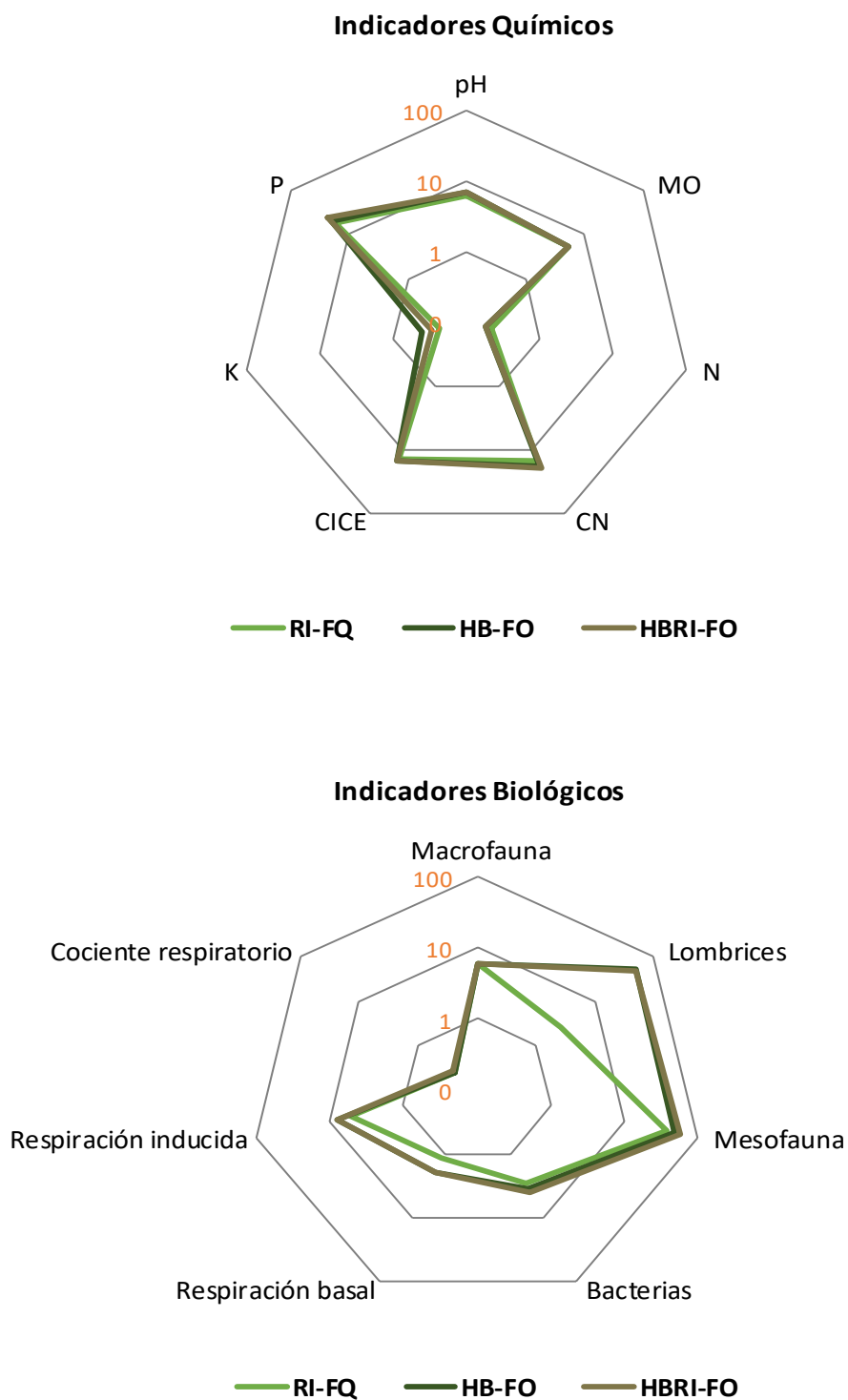


Figura 5.5. Indicadores químicos e indicadores biológicos del suelo de las subparcelas objeto de estudio. RI-FQ: manejo convencional con cultivo de raigrás italiano y fertilización química; HB-FO: manejo alternativo con cultivo de haba forrajera (HB) y fertilización orgánica; HBRI-FO: manejo alternativo con intercultivo de haba-raigrás (HBRI) y fertilización orgánica; MO: materia orgánica; CN: relación carbono/nitrógeno; CICE: capacidad de intercambio catiónico.

5.4. DISCUSIÓN

Con la entrada en vigor de la Política Agraria Común (PAC) para el período 2015-2020, las explotaciones agrarias han tenido que orientar su actividad hacia un modelo más sostenible capaz de afrontar los nuevos retos en materia de cambio climático y medio ambiente. En la política agraria ya no sólo deben tenerse en cuenta aspectos como el rendimiento productivo y la calidad nutritiva, sino que además deben considerarse otros factores de igual importancia como la sostenibilidad y las prácticas respetuosas con el clima y el medio ambiente. Por ello, el primer paso es la selección de cultivos alternativos y competitivos.

El raigrás italiano (*Lolium multiflorum* Lam.) es la gramínea más utilizada para la obtención de forraje para ensilar en las explotaciones ganaderas del Principado de Asturias, ya que es una especie de fácil y rápido establecimiento y posee una alta calidad forrajera (Canals *et al.*, 2009). Así, estudios llevados a cabo por Martínez-Fernández *et al.* (2008) reportan producciones que alcanzan los 8700 kg MS ha⁻¹, aunque el rendimiento medio obtenido en el presente experimento fue menor (5730 kg MS ha⁻¹). Esta elevada producción se consigue a base de aportar nitrógeno mineral en abundancia, 60 kg N ha⁻¹ con el abonado de fondo y otro tanto en cobertera después del primer corte para ensilado en primavera. Este manejo intensivo, requiere muchas labores agrarias y repetido de forma continuada provoca el agotamiento del suelo (Martínez-Fernández *et al.*, 2014). Además, con frecuencia el corte invernal es difícil de llevar a cabo debido a las condiciones medioambientales que inducen exceso de humedad en el suelo, dificultando el trabajo de la maquinaria. A estos inconvenientes hay que sumar el encarecimiento de los gastos del cultivo en un sistema de varios cortes y las pérdidas de valor proteico y posibilidades de encamado cuando se da un solo corte (Fernández-Lorenzo *et al.*, 2004), además de la baja concentración de proteína bruta del conjunto de la rotación raigrás italiano-maíz forrajero (Pereira *et al.*, 2009).

En el primer ensayo de la presente tesis (Capítulo 4), realizado en parcelas experimentales de reducidas dimensiones (5,5 m x 5,5 m), se concluyó que el haba forrajera (*Vicia faba* L.) en monocultivo o en intercultivo con raigrás italiano son claras alternativas forrajeras al uso de raigrás italiano en monocultivo, ya que, entre otros aspectos, no comprometen el rendimiento productivo de la explotación. En este ensayo, realizado en gran parcela con el fin de obtener resultados comparables a los de una explotación real, se observó que con las alternativas ensayadas (HB y HBRI) no solo se obtuvieron mayores rendimientos productivos que con el cultivo convencional (RI), sino que, además, el uso de mecanizado fue mínimo (aprovechamiento

en un único corte), lo que implica ahorros energéticos y beneficios en la salud del suelo al reducirse la compactación derivada de un menor uso de maquinaria agrícola.

El intercultivo HBRI fue el cultivo más productivo de los estudiados. Son numerosos los estudios que argumentan que los intercultivos gramínea-leguminosa mejoran la productividad y contribuyen sustancialmente a una agricultura más sostenible, con consecuencias positivas para el medio ambiente (Lüscher *et al.*, 2014, Helgadóttir *et al.*, 2018). Concretamente, varios autores han demostrado que cultivos asociados de HB con otras especies incrementan sensiblemente las producciones y proporcionan rendimientos muy rentables (Li *et al.*, 1999; Agegnehu *et al.*, 2006; 2008; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2008), debido principalmente al incremento de fertilidad del suelo (Doltra y Olesen, 2013). Otros estudios indican que el aumento de la biodiversidad de las asociaciones de cultivos produce una mejora en los servicios ecosistémicos, incluido el rendimiento del forraje (Sturludóttir *et al.*, 2013). Finn *et al.* (2013), en su experimento sobre agrodiversidad realizado en Europa, en una amplia gama de condiciones edafoclimáticas, demostraron que las mezclas multiespecie, en manejo intensivo de pasto, ofrecen mayores rendimientos de lo que se esperaría de esas mismas especies en monocultivo. Esto puede explicarse por la mejora que se produce en la adquisición de recursos en el tiempo y el espacio, también llamada nicho de complementariedad, a las interacciones interespecíficas positivas que se generan y la selección previa de las especies más productivas (Cardinale *et al.*, 2007).

Generalmente, las leguminosas poseen mayor contenido en proteína que las gramíneas. Sin embargo, en los resultados obtenidos en este ensayo, se observó que no hubo diferencias significativas entre el contenido en PB de los cultivos con leguminosa (HB y HBRI) y el contenido en PB del RI (Tablas 5.3 y 5.4). Esto difiere de los resultados obtenidos en el “Capítulo 4” de la presente tesis, donde el haba forrajera en monocultivo presentó valores de PB de 16,73% respecto al 9,04% del RI. Estos resultados pueden deberse a las condiciones ambientales, ya que el régimen pluviométrico no solo influye en el desarrollo y producción de los cultivos, sino que también condiciona el momento de cosecha y los trabajos de laboreo. Unas precipitaciones abundantes, unidas a una elevada pendiente en la parcela (10-20%), impidieron la entrada de la cosechadora en el momento adecuado afectando así al contenido en PB de los cultivos de HB y HBRI. En las leguminosas forrajeras, se considera el comienzo de la floración (aparición del 5-10% de las flores) como el momento óptimo de aprovechamiento, pero, en estados fenológicos posteriores el nivel de PB disminuye de manera notable (Ferrer, 2016) como consecuencia de la pérdida de hojas. Las diferencias en calidad nutritiva y aporte energético de estos cultivos ya fueron observadas en el “Capítulo 4” de esta tesis y se deben fundamentalmente a su estructura química. El haba forrajera es una leguminosa de alto porte que necesita lignificar sus tallos para

mantenerse erguida. Esta lignificación se ve reflejada en los mayores contenidos en fibras (FND y FAD) presentes en HB y HBRI respecto al RI. Cuanto mayor es el contenido en fibra de un forraje, menor es su digestibilidad. Además, las gramíneas contienen más hidratos de carbono no estructurales (almidón o azúcares) que las leguminosas, por lo tanto, son más energéticas (Ferrer, 2016).

Dado que la forma habitual de conservar el forraje en el Principado de Asturias es el ensilado, la ensilabilidad de los forrajes alternativos debe ser igual o superior a la del forraje convencional. En general, con las gramíneas forrajeras se puede hacer un buen ensilado porque la relación azúcares/proteína es más adecuada para ello que en las leguminosas; se recomienda un valor superior al 0,8 (Ferrer, 2016). En el caso del haba forrajera, los valores obtenidos para dicha relación (0,9 en este experimento y 0,6 en el Capítulo 4) resultaron más adecuados que los observados en otras leguminosas ensayadas como el trébol violeta y el altramuz blanco (0,5 y 0,4 respectivamente). Otra referencia utilizada frecuentemente para caracterizar el potencial de acidificación de un cultivo es la relación entre azúcares y la capacidad tampón (AZSOL/CT). Para tener ensilado de buena calidad, sin presencia de ácido butírico, esta relación debe ser igual o superior a 3 (Weissbach, 1999; Dinic *et al.*, 2010). Considerando este criterio, tanto el RI como las alternativas forrajeras ensayadas, están lejos de este valor (0,89; 0,54 y 0,63 para RI, HB y HBRI respectivamente).

Martínez-Fernández *et al.* (2013) indican que valores de $CT < 25 \text{ meq NaOH } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MS}$ unido a contenidos en $AZSOL > 25\%$ permiten clasificar a los forrajes en la categoría de “alta ensilabilidad”. En el presente ensayo, los valores de $CT < 25 \text{ meq NaOH } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MS}$ obtenidos para HB y HBRI combinado con los contenidos en AZSOL y MS, clasificaron a las alternativas forrajeras con leguminosa como forraje de alta ensilabilidad por encima del raigrás italiano que a partir de los valores obtenidos fue clasificado en la categoría de ensilabilidad media-alta.

Los elevados niveles de ácido butírico, ácido acético y nitrógeno amoniacal presentes en el ensilado de HBRI, junto con la disminución en el nivel de ácido láctico, son evidencias de que se produjo una contaminación con bacterias del género *Clostridium* durante el proceso de elaboración del ensilado (Mohamed, 2002). A pesar de estas deficiencias en la calidad fermentativa, este forraje presentó una estabilidad aeróbica aceptable al menos durante los siete primeros días tras la apertura del silo. Esto es debido a que existe una relación inversa entre la estabilidad aeróbica y el contenido de nitrógeno amoniacal (Martínez-Fernández *et al.*, 2016b). Además, elevadas cantidades de ácidos grasos volátiles, principalmente los ácidos

acético y propiónico, mejoran la estabilidad del ensilado debido a sus propiedades antimicrobianas ya que actúan inhibiendo el crecimiento de especies específicas de levaduras responsables del calentamiento tras la exposición al aire (Kung *et al.*, 2003).

Los resultados observados en el perfil de ácidos grasos del ensilado respecto al forraje de partida coinciden con otros estudios que afirman que el prehenificado del forraje causa pérdidas oxidativas en los ácidos grasos poliinsaturados, principalmente ácido linolénico (C18:3 *cis*-9 *cis*-12 *cis*-15), que disminuye en la proporción de ácidos grasos totales con un aumento simultáneo en dicha proporción de ácido palmítico (C16:0) (Van Ranst *et al.*, 2009; Khan *et al.*, 2011). Numéricamente, los cultivos alternativos ensayados (HB y HBRI) no mejoraron el perfil lipídico en comparación con el cultivo convencional (RI) respecto al sumatorio de ácidos grasos saturados e insaturados. Esto puede deberse a que la fertilización con nitrógeno desencadena la síntesis y acumulación de lípidos y ácidos grasos en la planta, especialmente de ácidos grasos poliinsaturados, como el linolénico (C18:3 *cis*-9 *cis*-12 *cis*-15) y el linoleico (C18:2 *cis*-9 *cis*-12) (Clapham *et al.*, 2005), y por tanto el RI puede verse favorecido. Sin embargo, las alternativas, a las que no se les aplicó fertilización orgánica, mostraron contenidos de ácido linoleico muy superiores a los de RI. Cabe destacar que la ingesta por las vacas de forrajes ricos en ácido linoleico causa un incremento lineal de la producción de ácido linoleico conjugado (CLA) en la leche (Morales-Almaráz *et al.*, 2010) al ser éste el principal derivado de la biohidrogenación del ácido linoleico en el rumen; lo que es de especial importancia si tenemos en cuenta los beneficios nutricionales asociados con el consumo de este ácido graso. Se ha demostrado que el CLA está relacionado con la función inmunológica y tiene efectos protectores contra el cáncer, la obesidad, la diabetes y la aterosclerosis (Yang *et al.*, 2015).

Numerosos autores han estudiado los parámetros fisicoquímicos como sensores de calidad edáfica debido a que son propiedades vinculadas a las funciones de retención y provisión de agua y nutrientes. Sin embargo, generalmente se requiere de varios años para detectar cambios significativos como resultado de perturbaciones (Costa *et al.*, 2014; Trasar-Cepeda *et al.*, 2008). Esta afirmación se corresponde con los resultados obtenidos en este experimento en el cual dichos parámetros no fueron capaces de establecer diferencias claras entre manejo convencional y alternativo después de dos años de estudio. Por ejemplo, la materia orgánica del suelo está considerada un indicador fundamental de la calidad del suelo (Ciais *et al.*, 2013) ya que incide directamente en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Sin embargo, en este estudio no se observaron diferencias significativas entre tratamientos en relación con este parámetro. Esto sugiere que la materia orgánica puede ser un indicador poco sensible en suelos

agrícolas a la hora de comparar diferentes manejos ya que la aplicación de fertilizantes, al igual que influye en la producción, tiene efectos sobre su contenido (Bauer y Black, 1994). La relación C/N, es un buen índice de la mineralización de la materia orgánica del suelo y, en climas tibios, su valor debe estar entre 10 y 12 (Vázquez *et al.*, 2017). En este estudio, los valores observados en las subparcelas fueron iguales o mayores a 15, lo que indica una lenta mineralización y humificación de la materia orgánica en ambos manejos. Según lo establecido por la USDA (Soil Survey Staff, 2014), el intervalo de pH adecuado para la mayoría de los cultivos y la máxima disponibilidad de nutrientes se corresponde con valores de pH entre 5,6 y 7,3. Aunque la subparcela convencional presentó un valor de pH ligeramente más ácido que las subparcelas alternativas, esto no trajo consigo ningún cambio en el efecto del intervalo. El contenido en K fue el único parámetro que mostró diferencias significativas entre manejo convencional y alternativo (Tabla 5.5) y el único indicador químico en el que se observó una tendencia a la separación entre manejos (Figura 5.5). Las subparcelas alternativas al RI (HB y HBRI) presentaron mayores concentraciones de este elemento, pero estas concentraciones resultaron bajas teniendo en cuenta que fueron fertilizadas con purín de vacuno. El efecto antagónico que indicó deficiencia de Mg en el suelo (lo que sucede cuando la relación Ca/Mg está por encima de 10 y la relación K/Mg por encima de 0,3) fue observado en todas las subparcelas independientemente de la fertilización y el cultivo.

Las propiedades biológicas y bioquímicas del suelo pueden responder más rápidamente a las actividades de manejo y a las perturbaciones que las físicas y/o químicas (Gianfreda y Ruggiero, 2006; Paz-Ferreiro *et al.*, 2007) por lo que resultan más adecuadas para estimar la calidad del suelo y su posible degradación en una escala de tiempo menor. Además, los parámetros relacionados con la abundancia, actividad y diversidad microbiana son integradores de todas y cada una de las perturbaciones que sufre un suelo con una sensibilidad a los cambios provocados por el uso del suelo y una rapidez de respuesta que permite su uso como señales de alarma, antes de que se produzcan alteraciones más severas (Soilmontana, 2012).

Los resultados del estudio de salud del suelo mostraron que indicadores biológicos como la biodiversidad y abundancia edáfica y su actividad se vieron afectadas por el manejo convencional (cultivo de RI y fertilización inorgánica) con descensos significativos respecto al manejo alternativo (cultivo de HB y HBRI y fertilización orgánica con purín de vacuno). La macrofauna (>1mm) es el eslabón superior de la cadena trófica del suelo y se ocupa de comenzar el proceso de descomposición de los restos orgánicos para ponerlos a disposición de los niveles tróficos inferiores. Los suelos de las tres subparcelas presentaron valores bajos de este indicador

sin diferencias entre manejos, de ahí la lenta mineralización de la materia orgánica observada a través de la relación C/N en todas ellas. Dentro de la macrofauna del suelo, el grupo más estudiado en relación a la estructura del suelo son las lombrices de tierra (Shipitalo, 2002). La abundancia de este indicador fue notablemente superior en el manejo alternativo (abonado orgánico). A consecuencia de esto, los parámetros físicos de tiempo de infiltración y compactación se vieron favorecidos, ya que las lombrices, en su movimiento a lo largo del perfil del suelo, crean una red de canales interconectados que favorecen la infiltración y permiten el paso de raíces sin necesidad de romper los agregados (Huggins y Reganold, 2008), lo cual es vital en suelos agrícolas para mitigar la compactación del suelo. El tiempo de infiltración, definido como el tiempo necesario para que percole la cantidad de agua caída durante una hora de lluvia fuerte-muy fuerte (30 L m⁻² según la Agencia Estatal de Meteorología), fue muy bajo en las subparcelas con manejo alternativo en comparación con la subparcela en manejo convencional, que requirió cerca de un cuarto de hora para infiltrar la misma cantidad de agua. Esto puede implicar un riesgo moderado de sufrir encharcamientos y/o problemas de escorrentía superficial en las zonas de mayor pendiente durante episodios lluviosos. La mayor abundancia de lombrices y la consiguiente mejora en la circulación de agua y aire, proporcionó una mayor disponibilidad de sustratos lábiles, lo que podría explicar la mayor actividad microbiana estimada a través de la respiración basal. Una alta respiración basal indica que el suelo está activo y, por tanto, funcionando, pero también supone emitir más CO₂ a la atmósfera. Los organismos que integran la mesofauna del suelo (0,1-1 mm) son muy sensibles a los cambios que ocurren en el medio edáfico por lo que son considerados como buenos indicadores de salud del suelo (Socarrás, 2013). La subparcela HBRI fue la que presentó mejores valores de este índice, lo que sugiere que las asociaciones de cultivos fomentan la biodiversidad del sistema suelo-planta. Según Hervé y Vidal (2008), las comunidades de invertebrados edáficos se ven favorecidas por ambientes caracterizados por diversidad florística.

La mayor diversidad de bacterias en las subparcelas con manejo alternativo indicó una mayor capacidad de las comunidades bacterianas de estas subparcelas para catabolizar las diversas fuentes de carbono. La abundancia (biomasa) microbiana, estimada indirectamente a partir de la respiración inducida por sustrato en condiciones no limitantes de alimento, fue significativamente superior bajo manejo alternativo. La biomasa microbiana se refiere al componente vivo de la materia orgánica del suelo, y su valor como bioindicador de la fertilidad del suelo está bien establecido (Powlson *et al.*, 1987). Resulta ser una medida más sensible a los cambios en la salud del suelo debido a su manejo que la proporcionada por el contenido en materia orgánica, pues revela tendencias en plazos de tiempo de entre 1-5 años como en este

estudio. Reducciones en la biomasa microbianas están normalmente relacionadas con una disminución en la entrada de carbono al suelo o, por ejemplo, con el impacto de laboreos intensivos y/o sustancias tóxicas (Paul *et al.*, 1984). Aunque los valores de este indicador se vieron incrementados bajo manejo orgánico, fueron valores bajos, lo cual hace que el cociente respiratorio (respiración basal/inducida) sea también bajo incluso bajo manejo alternativo. Esto refleja un uso poco eficiente del carbono disponible por parte de las poblaciones microbianas, las cuales, aunque mantienen una alta respiración, no son capaces de aumentar su biomasa. Esta situación es propia de ecosistemas jóvenes en evolución (a medida que maduran, ganan biomasa y ralentizan los flujos de energía) o incluso podría sugerir la presencia de condiciones de estrés microbiano como consecuencia del sistema de laboreo, si descartamos la presencia de sustancias tóxicas. Por otra parte, un alto cociente respiratorio supone favorecer la salida de carbono del suelo a la atmósfera en forma de CO₂. Por esta razón, las emisiones de CO₂ medidas en campo fueron superiores bajo manejo alternativo, debido a que el aumento de actividad microbiana (respiración basal) no fue acompañado en la misma medida por un aumento de su biomasa (respiración inducida), lo cual afectó en su conjunto al servicio edáfico de “Lucha contra el cambio climático” (secuestro de carbono).

5.5. CONCLUSIONES

La asociación leguminosa-gramínea (HBRI) permitió obtener mayores rendimientos que el monocultivo de las respectivas especies que lo conforman (HB y RI), con mayores rendimientos en proteína y energía por ha.

Los cultivos alternativos (HB y HBRI) presentaron una mejor ensilabilidad y estabilidad aeróbica que el cultivo convencional (RI) además de un elevado contenido en ácido linoleico. Sin embargo, sus ensilados pueden sufrir una pérdida proteica derivada de una elevada amoniogénesis.

El diagnóstico global de salud del agroecosistema fue superior en la parcela con fertilización orgánica e intercultivo HBRI, con una mayor diversidad en macro y mesofauna, lo que a su vez mejoró los parámetros fisicoquímicos del suelo.

CAPÍTULO 6

Evaluación del ensilado de haba forrajera en monocultivo o en intercultivo con raigrás italiano en la alimentación de vacuno lechero

6. EVALUACIÓN DEL ENSILADO DE HABA FORRAJERA EN MONOCULTIVO O EN INTERCULTIVO CON RAIGRÁS ITALIANO EN LA ALIMENTACIÓN DE VACUNO LECHERO

6.1. INTRODUCCIÓN

Como resultado de los ensayos agronómicos descritos en los capítulos anteriores de esta tesis, tanto en parcela experimental como en gran parcela, podemos afirmar que el haba forrajera en monocultivo y en intercultivo con raigrás italiano, ambos con fertilización orgánica, son unas buenas alternativas al cultivo convencional raigrás italiano, tanto por su rendimiento productivo y características de ensilabilidad como por sus múltiples servicios ecosistémicos. Sin embargo, antes de recomendar estos cultivos a los ganaderos para que los integren en sus explotaciones, es necesario comprobar el efecto que puedan llegar a tener sobre la ingestión, y cómo influyen en la producción y composición de la leche. Por ello, con los ensilados procedentes del ensayo en gran parcela (Capítulo 5), se realizaron dos ensayos de alimentación *in vivo* en vacas lecheras (Capítulo 6). La finalidad de este tercer experimento fue evaluar el efecto de la inclusión de dichos ensilados en las raciones para vacuno lechero sobre la ingestión voluntaria y sobre la producción y composición de la leche en comparación con el raigrás italiano utilizado habitualmente.

La preocupación actual por el medio ambiente, el bienestar animal, el origen del producto y el método de producción animal se refleja en una preferencia, por parte de los consumidores, por los productos alimenticios procedentes de sistemas de producción basados en pastos. Según Elgersma (2015), el pastoreo es la forma más rentable de alimentar a las vacas lecheras. Además, las dietas basadas en pastos y sus ensilados pueden mejorar la calidad nutricional de la leche al cambiar su composición de ácidos grasos hacia menos ácidos grasos saturados y más ácidos grasos poliinsaturados, especialmente los del grupo omega-3 (Dewhurst *et al.*, 2006). Kalac y Samková (2010) indican que las leguminosas forrajeras muestran una mayor eficiencia de transferencia de ácidos grasos poliinsaturados a la grasa de la leche bovina en comparación con las gramíneas. La inclusión de ensilado de leguminosas en las raciones de vacas lecheras permitiría, en consecuencia, mejorar el perfil lipídico de la leche desde el punto de vista de la salud humana. Este hecho, junto con la necesidad de reducir los costes, particularmente en las proteínas dietéticas y los fertilizantes para el suelo, significa que los ensilados de leguminosas, como el haba forrajera, representan una opción importante e interesante para los agricultores europeos (Dewhurst *et al.*, 2003a).

Por tanto, el objetivo de este tercer experimento fue evaluar la posibilidad de sustituir total o parcialmente el ensilado de raigrás italiano en la alimentación de vacas lecheras por ensilado de haba forrajera sin que se vea afectada la producción ni la calidad de la leche, de modo que pueda minimizarse la compra de alimentación externa, especialmente piensos proteicos.

6.2. MATERIAL Y MÉTODOS

6.2.1. Localización del ensayo

Los ensayos de alimentación se realizaron en las instalaciones de la Unidad de Leche del Área de Nutrición, Pastos y Forrajes perteneciente al Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA) situada en Villaviciosa (43° 28' 20" N, 5° 26' 10" O, 10 msnm), en la zona costera central de Asturias (Figura 6.1).

La Unidad de Leche consta de 17 ha de parcelas polifitas para pastoreo rotacional, 7 ha para rotación de cultivos forrajeros y una cuadra con estabulación libre dotada de 12 comederos monitorizados para el control individual de alimento. También está provista de un robot de ordeño con registro automático de producción de leche, dispensador de pienso suplementario durante el ordeño en función del nivel de producción de leche de cada vaca y muestreador de leche.



Figura 6.1. Localización de la Unidad de Leche (parcelas e instalaciones) del área de Nutrición, Pastos y Forrajes del Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario de Villaviciosa (Asturias). Fuente: Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (<https://sig.mapama.gob.es/siga/>).

6.2.2. Diseño Experimental

Se programaron dos ensayos de alimentación con vacas frisonas en el segundo tercio de lactación procedentes del rebaño experimental del SERIDA. El primer ensayo se realizó del 13 de octubre al 17 de diciembre de 2015 y el segundo del 10 de octubre al 9 de diciembre de 2016.

En ambos ensayos, se siguió un sistema de manejo semi-extensivo, con 18 horas de pastoreo y 6 horas de estabulación con acceso a raciones completas mezcladas (TMR). Se utilizó un diseño en cuadrado latino de 3x3, con tres dietas ofertadas a tres grupos de tres vacas (distribuidas al azar) en tres periodos de alimentación consecutivos. Cada período constó de 21 días de los cuales los 14 primeros días fueron de adaptación a la dieta y los últimos 7 días de control y muestreo. Los tres grupos de animales se rotaron de manera que, al final de los tres periodos de ensayo, todas las vacas recibieran las tres raciones objeto de estudio (Figura 6.2).

Las vacas se ordeñaron dos veces al día (mañana y tarde) mediante un sistema voluntario de ordeño equipado con un distribuidor automático de pienso suplementario.

Las raciones se elaboraron diariamente tras el ordeño de la mañana distribuyéndose en los comederos en función de cada tratamiento (dieta) tras la retirada el rechazo del día anterior.

El primer y último día del período de control y muestreo se procedió al pesaje de las vacas y se realizó el control de la producción de la parcela de pastoreo correspondiente.

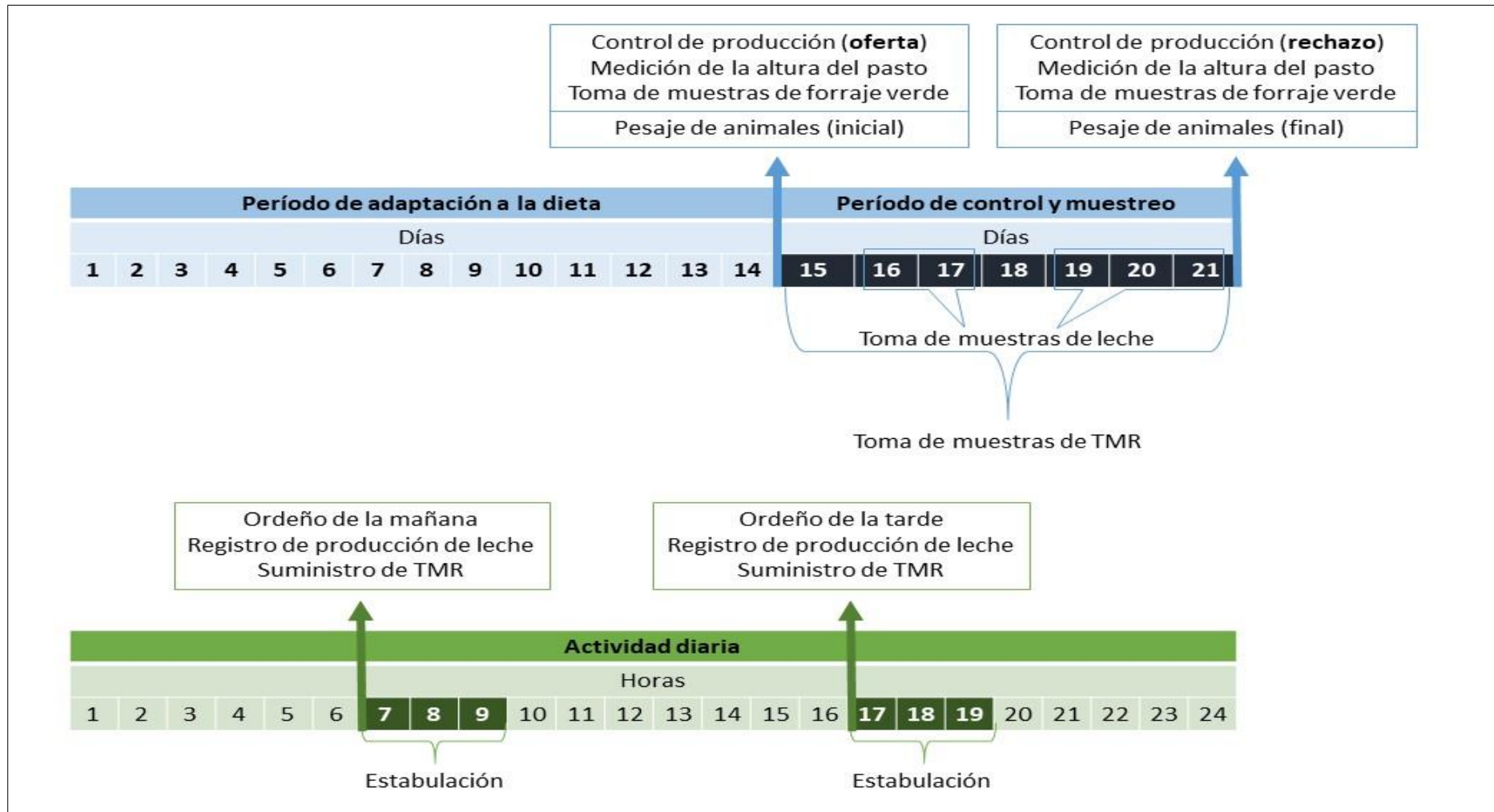


Figura 6.2. Esquema de las fases experimentales (adaptación a la dieta y muestreo) y de las actividades diarias realizadas en cada período en los ensayos de alimentación *in vivo* en vacuno lechero (años 2015 y 2016).

6.2.2.1. Animales

En el primer ensayo (2015) se utilizaron 9 vacas frisonas con un peso vivo promedio de 648 (\pm 59) kg y una producción media de leche diaria de 29,6 (\pm 2,0) kg. En el segundo ensayo (2016), se utilizaron 8 animales, ya que una de las vacas tuvo que ser retirada por un proceso patológico, por lo que sus datos no fueron considerados. El peso vivo promedio de este lote fue de 664 (\pm 62) kg y la producción media de leche diaria de 33,6 (\pm 5,0) kg.

Los ensayos se llevaron a cabo bajo las condiciones del Real Decreto 53/2013, de 1 de febrero, por el que se establecen las normas básicas aplicables para la protección de los animales utilizados en experimentación y otros fines científicos, incluyendo la docencia (BOE, 2013).

6.2.2.2. Tratamientos o dietas

Los tratamientos consistieron en tres raciones *unifeed* (TMR) formuladas con los ensilados procedentes del “Capítulo 5” de esta tesis, paja y concentrado en los porcentajes que se detallan en la Tabla 6.1.

El cálculo de las raciones se realizó en función de los análisis de laboratorio de los diferentes componentes. Se formularon dietas isoenergéticas e isoproteicas según los requerimientos del NRC (2001).

Tabla 6.1. Composición porcentual de ingredientes de las raciones totales mezcladas (TMR) en los dos ensayos de alimentación realizados (años 2015 y 2016).

	<i>Ensayo 1 (2015)</i>			<i>Ensayo 2 (2016)</i>		
	TMR 1	TMR 2	TMR 3	TMR 1	TMR 2	TMR 3
Ingredientes (% MS)						
Ensilado de RI	57,01	-	-	45,91	-	-
Ensilado HB	-	65,95	-	-	60,46	-
Ensilado HBRI	-	-	63,25	-	-	52,37
Paja	9,87	7,04	5,67	5,66	4,14	4,71
Concentrado ¹	33,12	27,01	31,08	48,43	35,40	42,92

RI: monocultivo de raigrás italiano de primer corte; HB: haba forrajera en monocultivo; HBRI: intercultivo haba forrajera-raigrás italiano (60% - 40%); MS: materia seca.

¹Copos de maíz termoaplastados (44%); harina de extracción de soja tostada (34%); maíz (4,73%); pulpa de remolacha azucarera (6,21%); sales de ácidos grasos de palma (2,63%); cebada (2,20%); semilla de algodón (2,20%); bicarbonato de sodio (1,85%); carbonato de calcio (0,70%); cloruro de sodio (0,66%); fosfato bicálcico (0,62%); corrector vitamínico mineral (0,20%).

Las raciones fueron ofrecidas *ad libitum* en el pesebre como complemento a un pastoreo diario de 18 horas en parcelas polifitas. Además, en el momento del ordeño, las vacas recibieron

un pienso suplementario (no incluido en la mezcla) ofertado en función de la producción de leche. Las vacas tuvieron libre acceso a agua fresca tanto en las parcelas de pastoreo como en la estabulación.

6.2.3. Control de la ingestión de alimentos y de la producción de leche

Se realizaron controles de ingestión (TMR, pienso suplementario y hierba) y de producción de leche de forma individualizada.

6.2.3.1. Ingestión de TMR y pienso suplementario

Los consumos de las TMR se registraron diariamente de forma automática, mediante un sistema monitorizado de balanzas (Fotografía 6.1) instalado en la zona de alimentación de la estabulación que aporta los valores de ingestión voluntaria y que está basado en un diseño de Bach *et al.* (2004). Se emplearon un total de 9 balanzas (Mettler Toledo IND 425-CC300) con una capacidad de pesada de hasta 300 kg y una resolución de ± 100 g. Sobre cada balanza se colocó un cajón de fibra de vidrio de 150 L de capacidad como recipiente para la TMR ofertada. Cada comedero disponía de un lector de presencia (CP-15 de Circontrol) que detecta el paso de un transponder (TAG CT-50 de Vicic, Circontrol) identificativo de cada vaca colocado en su oreja derecha, de forma que el sistema es capaz de detectar cada vez que una vaca accede y abandona el comedero y, por tanto, permite conocer el tiempo que cada animal ocupa un comedero. Simultáneamente, la balanza registra las variaciones de peso durante el tiempo de permanencia de una vaca en el puesto de alimentación, estimando como cantidad consumida la diferencia de peso de alimento en el cajón entre la entrada y la salida de la vaca. Los datos de los consumos individuales se procesaron con un programa informático desarrollado por Asturlan de Comunicaciones, S.L. (Gijón, Asturias, España), obteniendo así el consumo de materia fresca total diario de TMR por vaca.

La ingestión del pienso suplementario fue registrada de forma automática por el robot de ordeño (DeLaval VMS™, Tetra Laval International S.A., Tumba, Suecia) durante cada sesión (Fotografía 6.1.).



Fotografía 6.1. Sistema de control de ingestión de las raciones TMR (izquierda) y robot de ordeño (derecha).

6.2.3.2. Ingestión de hierba

La ingestión de forraje fresco en pastoreo fue estimada siguiendo el método de rendimiento animal propuesto por Macoon *et al.* (2003) mediante la siguiente ecuación:

$$MSI_{\text{hierba}} = (EN_L - EN_{\text{pienso}} - EN_{\text{TMR}}) / EN_{\text{hierba}}$$

Donde,

MSI_{hierba} : materia seca ingerida de pasto (kg MS día⁻¹).

EN_L : requerimientos de energía neta total para lactación (Mcal día⁻¹).

EN_{pienso} : aporte de energía diario del pienso (Mcal día⁻¹).

EN_{TMR} : aporte de energía diario de la TMR (Mcal día⁻¹).

EN_{hierba} : contenido energético de la hierba consumida en pastoreo (Mcal kg⁻¹).

Los requerimientos de EN_L corresponden al sumatorio de las necesidades de energía de energía neta de mantenimiento (EN_m), energía neta de gestación (EN_g), energía neta de producción de leche (EN_l), energía neta debida al cambio de peso corporal (EN_{pv}), actividad de pastoreo (EN_p) y actividad de desplazamiento (EN_d) todas ellas referidas a Mcal día⁻¹ según las ecuaciones de predicción del NRC (2001):

$$EN_L = EN_m + EN_g + EN_l + EN_{pv} + EN_p + EN_d$$

$$EN_m = k (0,08 * PV^{0,75})$$

Donde,

PV: peso vivo del animal.

k: constante con valor 1,2 para vacas de primer parto; 1,1 para vacas de segundo parto y 1 para vacas de tres o más partos.

$$EN_g = [(0,00318 * D - 0,0352) * (PTN/45) / 0,218]$$

Donde,

D: días de gestación.

PTN: peso del ternero al nacimiento (kg).

$$EN_l = \text{kg de leche por día} * [0,3512 + (0,0962 * \% \text{ grasa en leche})]$$

EN_{pv}: los requerimientos se aumentaron 5,12 Mcal por cada kg de PV ganado y se restaron 4,92 Mcal por cada kg de PV perdido.

$$EN_p (\text{Rochinotti, 1998}) = 1,2 \text{ kcal} * \text{tiempo de pastoreo (h)} * PV^{0,75}$$

$$EN_d (\text{AFRC, 1993}) = 0,62 \text{ cal} / (\text{kg PV} * \text{d})$$

Donde,

d: distancia recorrida (m) por los animales para ir y volver desde la estabulación a la parcela de pastoreo. En este ensayo se estimó una distancia media de 800 m.

La energía neta (EN) aportada por los alimentos (TMR, pienso suplementario y forraje verde) se determinó a partir de la ecuación de predicción del NRC (1989):

$$EN = (0,1569 * EM) - 0,07$$

Donde EM es la energía metabolizable (MJ kg⁻¹ MS) estimada según el modelo de MAFF (1984):

$$EM = k * MOD$$

Donde,

k: constante con valor 0,16 para forrajes frescos y ensilados en vacas lecheras.

MOD: materia orgánica digestible (%) calculada mediante la fórmula:

$$\text{MOD} = \% \text{ MO} * (\text{Do}/100)$$

Donde,

MO: materia orgánica (% MS).

Do: digestibilidad *in vivo* de la materia orgánica (%) que fue estimada por el método de fibra neutro detergente celulasa (Riveros y Argamentaría, 1987) según la ecuación:

$$\text{Do} = 5,76 + (0,57 * \text{De}) + (0,36 * \text{FND}) + (0,5 * \text{PB})$$

Donde,

De: digestibilidad enzimática de la materia orgánica (%).

FND: fibra neutro detergente (% MS).

PB: proteína bruta (% MS).

El contenido en EM de las TMR y del pienso se estimó como el promedio de la EM estimada mediante las ecuaciones propuestas por el MAFF (1984) y el ADAS (1985):

$$\text{EM}_{\text{MAFF}} = 10 * (0,012 * \text{PB} + 0,031 * \text{EE} + 0,005 * \text{FB} + 0,014 * \text{MELN})$$

$$\text{EM}_{\text{ADAS}} = 11,78 + (0,0654 * \text{PB}) + (0,0665 * \text{EE}^2) - (0,0414 * \text{EE} * \text{FB}) - (0,018 * \text{CEN})$$

Donde,

PB: proteína Bruta (% MS).

EE: extracto Etéreo (% MS).

FB: fibra Bruta (% MS).

CEN: cenizas (% sobre MS).

MELN: materiales extractivos libres de nitrógeno (%), estimados según la ecuación:

$$\text{MELN} = 100 - (\text{CEN} + \text{PB} + \text{EE} + \text{FB})$$

6.2.3.3. Producción de leche

La producción diaria de leche de cada ordeño (mañana y tarde) fue registrada individualmente en cada vaca mediante el robot de ordeño y gestionada a través del software DelPro™ para gestión del rebaño VMS de DeLaval.

6.2.4. Toma de muestras

6.2.4.1. Ensilados, TMR y pienso suplementario

Se tomaron muestras de cada ensilado, tal y como se describe en el apartado 5.2.7.2 del "Capítulo 5", antes de cada ensayo de alimentación para calcular la cantidad de ensilado a incorporar en la ración en función de su contenido en proteína bruta y de su aporte energético.

Durante la semana de muestreo de cada período, se tomaron diariamente muestras de cada TMR después de su elaboración (mediante carro mezclador) y se conservaron a -20°C hasta el final de cada período de ensayo, momento en el cual se descongelaron para formar una única muestra homogénea y representativa de cada período y de la cual se extrajeron dos submuestras para su análisis. Las muestras de TMR se secaron a 60°C durante 24 h (de la Roza-Delgado *et al.*, 2002) y fueron molidas a un tamaño de partícula de 0,75 mm (Fritsch Pulverisette 25) para su posterior análisis. Las muestras de pienso fueron molidas a un tamaño de partícula de 1 mm (Fritsch Pulverisette 14).

El pienso suplementario, dada su homogeneidad, fue muestreado una vez por período experimental al inicio de la fase de control.

6.2.4.2. Hierba

El día anterior a la entrada de los animales a la pradera seleccionada y al final de cada período experimental, se realizó un control de altura de la hierba y un control de producción del pasto siguiendo el protocolo para cultivos herbáceos descrito por Martínez-Fernández (1995) y Martínez-Fernández *et al.* (2018). Se efectuaron cinco lanzamientos al azar y en sentido perpendicular a la pendiente con un listón metálico de 2 m. Previamente al corte, se midió la altura de la hierba con un medidor de altura de pasto, en tres puntos diferentes a lo largo del listón en cada uno de los lanzamientos, acumulándose un total de 15 mediciones de alturas para cada parcela (Fotografía 6.2). En cada punto de muestreo se segó la hierba con una cortacésped

(Bosch AGS 70) provista de un peine de 10 cm de ancho acumulándose una muestra correspondiente a un área de 1 m² (5 submuestras x 2 m de longitud x 0,10 m de ancho) (Fotografía 6.2). Las muestras de forraje de cada parcela se pesaron para estimar la disponibilidad de hierba (kg de MV ha⁻¹), se determinó la composición botánica y posteriormente fueron secadas a 60°C durante 24 horas y molidas a 0,75 mm (Fritsch Pulverisette 25) para su posterior análisis y para determinar su rendimiento (kg de MS ha⁻¹).



Fotografía 6.2. Medición de la altura del pasto (izquierda) y control de producción (derecha) de las praderas utilizadas en el ensayo de alimentación de la presente tesis.

6.2.4.1. Leche

Durante cada período de muestreo, se tomaron muestras de leche de cada vaca en los ordeños de la mañana y de la tarde. Las muestras de leche destinadas al análisis de macronutrientes se tomaron en botes de polipropileno con un conservante (Azidiol) y fueron enviadas al Laboratorio Interprofesional Lechero de Asturias (LILA) situado en Llanera, Asturias.

Las muestras de leche destinadas al análisis de ácidos grasos se tomaron en botes sin conservante y fueron llevadas al laboratorio de Nutrición Animal del SERIDA. Para cada vaca, se realizó la mezcla proporcional de los ordeños de la mañana y de la tarde, en función de la producción, para obtener una muestra representativa de cada una de ellas y se extrajo la grasa mediante el método descrito por Feng *et al.* (2004) conservando la nata a -40°C hasta su posterior análisis.

La producción de leche fue estandarizada por grasa y energía (LCG) según Schlamber *et al.* (2010) mediante la siguiente ecuación:

$$\text{LCG} = \text{kg leche} * [(0,38 * \% \text{grasa}) + (0,21 * \% \text{proteína}) + 1,05] / 3,28$$

6.2.5. Determinaciones analíticas

6.2.5.1. Alimentos y forraje verde

Las muestras de alimentos (forraje verde, TMR y pienso) se analizaron en el Laboratorio de Nutrición Animal del SERIDA (Laboratorio Oficial del Principado de Asturias para análisis de alimentos destinados al ganado), acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) conforme a los criterios establecidos en la norma UNE-EN-ISO/IEC 17025 (nº de expediente LE/930).

Las muestras fueron analizadas por espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS) con un equipo NIRSystem 5000 (FOSS, Silver Spring, MD, USA). En el forraje verde se determinó el contenido en materia seca (MS), cenizas (CEN), proteína bruta (PB), fibra neutro detergente (FND), fibra ácido detergente (FAD) y digestibilidad enzimática de la materia orgánica (DEMO), utilizando las ecuaciones de predicción específicas desarrolladas en el laboratorio de Nutrición Animal del SERIDA. En las TMR y el pienso, se realizaron las mismas determinaciones excepto la DEMO y, además, se determinó el contenido en fibra bruta (FB), extracto etéreo (EE) y almidón (ALM). El contenido en energía metabolizable (EM) se estimó según las ecuaciones descritas en el apartado 6.2.3.2.

El perfil lipídico de las TMR se determinó siguiendo la metodología de Palmquist y Jenkins (2003), con análisis mediante cromatografía de gases y detector de masas (GC-4000, Varian, Inc., Palo Alto, CA, EE.UU.) empleando una mezcla patrón de 52 ésteres metílicos (GLC Reference Standards 463, Nu-Chek Prep, Inc., Elysian, MN, EE.UU.) para la identificación de compuestos mediante tiempo de retención y espectro de masas.

6.2.5.2. Leche

El análisis del contenido en macronutrientes de la leche (proteína, grasa, lactosa, extracto seco magro, urea y células somáticas) se realizó en el Laboratorio Interprofesional de

Asturias (LILA) mediante equipos de reflectancia de infrarrojo medio FTIR (MilkoScan FT 6000) acreditados por ENAC (n° de expediente LE/476).

El perfil de ácidos grasos de la leche se determinó a partir de la grasa extraída y conservada tras la mezcla proporcional de los ordeños. Las muestras, una vez descongeladas a temperatura ambiente, se centrifugaron a 19.300 xg durante 20 minutos (Eppendorf centrifuge 5415R). De la capa superior de lípidos, se tomó una alícuota de unos 40 mg para proceder a la metilación de ácidos grasos siguiendo la metodología de Christie (1982) con las modificaciones de Chouinard *et al.* (1999). Las muestras obtenidas tras este proceso se inyectaron en el equipo de cromatografía gases masas descrito en el apartado 6.2.5.1. La separación y cuantificación de los respectivos ésteres metílicos de los ácidos grasos se realizó siguiendo el mismo protocolo que en las TMR.

6.2.6. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico todos los resultados se utilizó el software estadístico de libre acceso R (R Core Team, 2017).

La homogeneidad de las varianzas se comprobó *a priori* mediante el test de Levene.

Los resultados de ácidos grasos de las TMR fueron contrastados mediante un análisis de varianza (ANOVA) utilizando un modelo de regresión lineal simple en el que se consideró el tipo de TMR como factor principal y el año como factor aleatorio. Las comparaciones *post hoc* de las medias entre tratamientos se realizaron aplicando un test de Duncan a un nivel de significación de $p < 0,05$.

Los resultados de peso vivo, consumos de materia seca y producción, composición en macronutrientes y perfil de ácidos grasos de la leche fueron contrastados mediante un análisis de varianza (ANOVA) utilizando un modelo de regresión lineal mixto considerando la dieta y período como efectos fijos y la vaca y el año como efectos aleatorios. Las comparaciones *post hoc* de las medias entre tratamientos se realizaron aplicando un test de Bonferroni, a un nivel de significación de $p < 0,05$. Para los datos heterocedásticos se realizó la prueba de Kruskal-Wallis y las comparaciones *post hoc* de las medias entre tratamientos se realizaron también aplicando también un test de Bonferroni con el mismo nivel de significación que en el caso anterior ($p < 0,05$).

6.3. RESULTADOS

6.3.1. Características de las parcelas de pastoreo

La disponibilidad y altura de la hierba, así como la composición botánica de las características de las parcelas destinadas a pastoreo en los dos ensayos de alimentación realizados se muestran en la Tabla 6.2.

La composición botánica de las parcelas utilizadas en los ensayos de alimentación presentó una distribución desigual de especies pratenses en cada período de ensayo y en los diferentes años de estudio. Las especies mayoritarias observadas dentro de la familia de las gramíneas fueron *Lolium perenne* L., *Agrostis spp.*, *Bromus spp.*, *Paspalum spp.*, y *Dactylis glomerata* L. De la familia de las leguminosas, la especie más abundante fue el *Trifolium repens* L. y de las dicotiledóneas, las especies del género *Taraxacum* fueron las más numerosas.

La altura del pasto, en el momento de introducir a las vacas en las parcelas, estuvo dentro de los valores considerados recomendables para pastoreo rotacional (entre 15 y 20 cm) en todos los períodos de los dos ensayos de alimentación realizados. La disponibilidad de hierba (oferta) se mantuvo por encima del mínimo apto para el pastoreo (del orden de 1100 kg MS ha⁻¹) a excepción de los dos últimos períodos del segundo ensayo (P2 y P3 del año 2016) en que se situó en torno a los 900 kg MS ha⁻¹.

6.3.2. Composición química de las dietas ofertadas

6.3.2.1. Valor nutritivo y aporte energético

La composición química de las raciones completas mezcladas (TMR), del pienso suplementario ingerido en la sala de ordeño y del pasto consumido por las vacas durante los ensayos de alimentación realizados en 2015 y 2016 se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.2. Características de las praderas destinadas al pastoreo de las vacas lecheras en cada periodo de los ensayos de alimentación realizados en 2015 y 2016.

	<i>Ensayo 1 (2015)</i>			<i>Ensayo 2 (2016)</i>		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Oferta						
Producción (kg MS ha ⁻¹)	2357	1701	1170	1635	895	932
Altura del pasto (cm)	31	22	31	24	25	32
Rechazo						
Producción (kg MS ha ⁻¹)	2024	1335	817	1406	502	900
Altura del pasto (cm)	20	17	16	17	18	15
Composición botánica (% MS)						
<i>Lolium perenne</i> L. (raigrás inglés)	68,07	9,39	59,50	10,62	33,29	NA
<i>Trifolium repens</i> L. (trébol blanco)	3,86	8,84	-	3,05	3,81	NA
<i>Trifolium pratensis</i> L. (trébol violeta).	-	-	2,78	-	-	NA
<i>Poa</i> spp. (poa)	1,29	-	-	-	0,57	NA
<i>Bromus</i> spp. (bromo)	-	1,42	-	17,86	11,02	NA
<i>Agrostis</i> spp.	7,12	63,16	9,60	-	19,84	NA
<i>Dactylis glomerata</i> L. (dactilo)	4,98	-	5,22	0,96	0,48	NA
<i>Holcus lanatus</i> L. (heno blanco)	-	-	-	2,30	1,24	NA
<i>Paspalum</i> spp.	-	-	-	27,10	-	NA
<i>Cyperus rotundus</i> L. (juncia redonda)	-	-	-	0,54	-	NA
<i>Stellaria media</i> L. (pamplina)	-	-	-	-	0,05	NA
<i>Rumex</i> spp.	0,73	-	-	3,08	-	NA
<i>Taraxacum</i> spp. (diente de león)	-	2,64	-	0,66	9,68	NA
<i>Geranium molle</i> L. (geranio de los caminos)	0,94	0,34	1,78	-	1,62	NA
<i>Ranunculus</i> spp.	-	-	-	0,60	-	NA
<i>Malva</i> spp.	-	-	-	4,34	-	NA
Otras gramíneas	1,37	3,90	3,09	16,75	6,15	NA
Otras dicotiledóneas	-	-	2,35	-	-	NA
Restos no identificables	-	2,68	5,30	0,60	7,01	NA
Materia muerta	11,64	7,63	10,38	11,54	5,24	NA

MS: materia seca; P1: período 1; P2: período 2; P3: período 3; NA: no analizada.

Tabla 6.3. Valor nutritivo y contenido energético de las raciones completas mezcladas (TMR) ofertadas en la estabulación en los tres tratamientos, del pienso suplementario aportado durante el ordeño y del forraje verde consumido en pastoreo de las vacas lecheras durante los ensayos de alimentación realizados en 2015 y 2016.

	<i>Ensayo 1 (2015)</i>							<i>Ensayo 2 (2016)</i>						
	TMR			Pienso	Pasto			TMR			Pienso	Pasto		
	RI	HB	HBRI		P1	P2	P3	RI	HB	HBRI		P1	P2	P3
Materia seca (MS)	28,01	37,05	28,20	88,36	14,70	15,09	10,43	29,71	35,07	30,61	88,02	21,93	15,87	12,82
Materia orgánica (MO)	87,90	85,34	88,26	92,42	89,69	89,81	88,15	89,09	89,38	88,97	91,46	92,37	89,85	90,62
Proteína bruta (PB)	13,97	13,15	13,25	20,07	17,91	20,67	22,17	15,14	14,62	15,39	20,52	16,50	24,81	24,38
Fibra neutro detergente (FND)	48,34	52,25	51,91	21,50	57,73	50,13	54,05	42,86	48,94	47,55	20,69	55,48	44,73	46,39
Fibra ácido detergente (FAD)	33,44	35,34	30,28	9,58	30,21	25,91	26,60	24,86	28,91	27,72	9,79	28,47	21,79	21,66
Extracto etéreo (EE)	4,02	2,42	2,78	5,25	NA	NA	NA	4,55	3,52	4,08	5,27	NA	NA	NA
Almidón (ALM)	8,42	8,79	10,17	37,17	NA	NA	NA	13,15	10,63	12,60	37,31	NA	NA	NA
Energía Neta para lactación (ENL)	1,39	1,39	1,39	1,93	1,47	1,55	1,45	1,50	1,39	1,39	1,94	1,50	1,68	1,68

RI: TMR elaborada con raigrás italiano de primer corte (100 %); HB: TMR elaborada con ensilado de haba forrajera (100 %); HBRI: TMR elaborada con intercultivo haba-raigrás (60-40 %); P1: período 1; P2: período 2; P3: período 3; MS (%); MO (% MS); PB (% MS); FAD (% MS); FND (% MS); EE (%); ALM (% MS); ENL (Mcal kg MS⁻¹).

Los resultados corresponden a la media de los dos ensayos de alimentación realizados (2015 y 2016) excepto en el pasto que debido a su variabilidad se presentan por períodos.

El contenido en MS y FND fue mayor en las raciones elaboradas con ensilado de HB los dos años de estudio. El contenido en PB fue similar para las tres raciones en los dos ensayos de alimentación realizados (año 2015 y año 2016). Se observaron diferencias en EE de las raciones elaboradas con HB y HBRI en el primer año de estudio respecto a las del segundo. El contenido energético fue igual para las tres raciones el primer año, mientras que, en el segundo ensayo de alimentación, la ración elaborada con ensilado de RI mostró un contenido ligeramente superior respecto a las otras dos raciones.

6.3.2.2. *Contenido en ácidos grasos*

Los ácidos grasos (AG) mayoritarios presentes en las TMR fueron el ácido palmítico (C16:0), oleico (C18:1 *cis*-9), linoleico (C18:2 *cis*-9 *cis*-12) y linolénico (C18:3 *cis*-9 *cis*-12 *cis*-15), constituyendo cerca del 93,87; 91,84 y 91,51% en las TMR elaboradas con ensilado de RI, HB y HBRI respectivamente (Tabla 6.4). El ácido linolénico fue el AG predominante en la TMR formulada con ensilado de RI mientras que en las raciones formuladas con ensilado de HB y HBRI el más abundante fue el linoleico. Se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el ácido palmítico, principal AG saturado, entre las raciones RI y HB. No se observaron diferencias significativas entre raciones en el ácido oleico ni en el linoleico. La dieta con RI presentó un mayor contenido de ácido linolénico ($p < 0,05$) respecto a las otras dos raciones.

6.3.3. **Ingestión de alimentos**

En la Tabla 6.5 se muestran los pesos iniciales y finales de las vacas incluidas en los ensayos de alimentación y el consumo medio de los alimentos. No se observaron diferencias significativas en el peso vivo, ni al inicio ni al final de los ensayos, ni en la ganancia de peso vivo de los animales en función de la dieta ingerida. Los consumos de materia seca de los alimentos ingeridos (TMR, pienso suplementario y pasto) fueron similares ($p > 0,05$) entre tratamientos.

Tabla 6.4. Perfil de ácidos grasos (g 100 g⁻¹ AG) de las raciones totales mezcladas (TMR) ofertadas a vacas lecheras.

	TMR			eer	p (D)	p (E)	p (DxE)
	RI	HB	HBRI				
Caproico (C6:0)	0,15 ^b	0,50 ^b	2,47 ^a	1,407	0,030	0,265	0,031
Caprílico (C8:0)	0,06	0,13	0,19	0,094	0,101	0,007	0,188
Cáprico (C10:0)	0,02 ^b	0,04 ^a	0,04 ^a	0,006	<0,001	0,582	0,732
Láurico (C12:0)	2,32	1,00	1,10	1,025	0,083	<0,001	0,077
Mirístico (C14:0)	0,69 ^b	0,98 ^a	0,89 ^a	0,087	<0,001	0,562	0,005
Pentadecanoico (C15:0)	0,08 ^c	0,16 ^a	0,13 ^b	0,022	<0,001	<0,001	0,023
Palmítico (C:16:0)	26,89 ^b	33,26 ^a	31,68 ^{ab}	4,676	0,086	0,010	0,504
Palmitoleico (C16:1 <i>cis</i> -9)	0,17 ^b	0,37 ^a	0,30 ^a	0,059	<0,001	<0,001	<0,001
Heptadecanoico (C17:0)	0,08 ^c	0,16 ^a	0,11 ^b	0,017	<0,001	0,019	0,003
Esteárico (C18:0)	1,97 ^b	2,89 ^a	2,41 ^{ab}	0,415	0,008	<0,001	0,305
Oleico (C18:1 <i>cis</i> -9)	12,44	16,42	15,65	3,803	0,199	0,490	0,413
Vaccénico (C18:1 <i>cis</i> -11)	0,52 ^b	0,81 ^a	0,71 ^{ab}	0,165	0,030	<0,001	0,015
Linoleico (C18:2 <i>cis</i> -9 <i>cis</i> -12)	26,69	34,93	32,38	5,765	0,077	0,286	0,704
Linolénico (C18:3 <i>cis</i> -9 <i>cis</i> -12 <i>cis</i> -15)	27,85 ^a	8,23 ^b	11,80 ^b	4,575	<0,001	0,783	0,017
Araquídico (C20:0)	0,07	0,12	0,08	0,041	0,147	<0,001	0,315

RI: TMR elaborada con raigrás italiano de primer corte (100 %); HB: TMR elaborada con ensilado de haba forrajera (100 %); HBRI: TMR elaborada con intercultivo haba-raigrás (60-40 %); eer: error estándar residual; D: dieta; E: ensayo. ^{a,b,c} Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de comparación de medias de Duncan ($p < 0,05$).

Los resultados corresponden a la media de los dos ensayos de alimentación realizados (año 2015 y año 2016).

Tabla 6.5. Peso vivo corporal inicial y final, ganancia de peso vivo, consumos de materia seca de vacas Holstein en función de la ración total mezclada (TMR) ofertada *ad libitum* en la estabulación y complementada con 18 h de pastoreo.

	TMR			rsd	p
	RI	HB	HBRI		
Peso vivo corporal (kg)					
Peso vivo inicial	644,4	643,1	640,2	12,950	0,634
Peso vivo final	648,6	645,1	648,4	13,559	0,648
Ganancia de peso vivo (kg día ⁻¹)	0,60	0,29	1,17	2,186	0,490
Consumos (kg MS día⁻¹ por vaca)					
TMR	10,16	9,21	9,52	1,945	0,398
Pienso suplementario	3,41	3,25	3,40	0,379	0,323
Pasto	10,79	11,98	13,33	5,530	0,423
Total	24,57	24,64	26,45	5,510	0,500

RI: TMR elaborada con raigrás italiano de primer corte (100 %); HB: TMR elaborada con ensilado de haba forrajera (100 %); HBRI: TMR elaborada con intercultivo haba-raigrás (60-40 %); rsd: desviación estándar residual.

^{a,b,c} Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de comparación de medias de Bonferroni ($p < 0,05$).

Los resultados corresponden a la media de los dos ensayos de alimentación realizados (2015 y 2016).

6.3.4. Producción y composición de la leche

Los efectos de las diferentes raciones ensayadas sobre la producción y composición de la leche se muestran en la Tabla 6.6. Aunque la producción diaria de leche mostró diferencias estadísticamente significativas entre las dietas en el análisis de varianza, las pruebas de comparaciones múltiples *post hoc* realizadas no mostraron diferencias significativas entre sí.

En cuanto a la composición de la leche (macrocomponentes), sólo se observaron diferencias significativas ($p < 0,001$) en el contenido en urea, siendo la leche producida la ración a base de ensilado de HB la que presentó una excreción más elevada de este compuesto seguida de HBRI y de RI.

Tabla 6.6. Producción y composición de la leche de vacas Holstein en función de la ración completa mezclada (TMR) ofertada formuladas con ensilado de raigrás italiano, haba forrajera e intercultivo de haba-raigrás.

	TMR			rsd	p
	RI	HB	HBRI		
Producción de leche (kg día⁻¹)					
Sin estandarizar	32,99	31,01	31,54	1,415	<0,001
Estandarizada por grasa y energía	30,46	29,41	29,19	1,216	0,007
Composición de la leche (%)					
Grasa	3,55	3,74	3,60	0,226	0,057
Proteína	2,99	3,07	2,98	0,166	0,260
Lactosa	4,79	4,74	4,75	0,180	0,679
Extracto seco magro	8,50	8,48	8,44	0,279	0,765
Células (células x 1000 mL ⁻¹)	63,81	66,44	55,46	34,70	0,607
Urea (mg L ⁻¹)	225 ^c	309 ^a	260 ^b	30,98	<0,001

RI: TMR elaborada con raigrás italiano de primer corte (100 %); HB: TMR elaborada con ensilado de haba forrajera (100 %); HBRI: TMR elaborada con intercultivo haba-raigrás (60-40 %); rsd: desviación estándar residual.

^{a,b,c} Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Bonferroni ($p < 0,05$).

Los resultados corresponden a la media de los dos ensayos de alimentación realizados (2015 y 2016).

El perfil lipídico de la leche de las vacas en función de la TMR ingerida se detalla en la Tabla 6.7. Los ácidos grasos (AG) mayoritarios presentes en la leche fueron el ácido palmítico (C16:0), mirístico (C14:0), oleico (C18:1 *cis*-9) y esteárico (C18:0), constituyendo aproximadamente el 77,47; 76,95 y 78,03% para las TMR elaboradas con RI, HB y HBRI respectivamente. El contenido de ácido palmítico fue mayor ($p < 0,05$) en la leche producida con las raciones que incluyeron ensilado de RI y HBRI que con las raciones que incluyeron ensilado de HB. La concentración de ácido mirístico de la leche fue similar para los tres tipos de dieta y

los contenidos de ácidos oleico y esteárico fueron superiores ($p < 0,001$) en la leche de las vacas alimentadas con raciones a base de ensilado de HB.

En el contenido total de AG de cadena corta (C6:0 - C13:0), se observaron diferencias significativas ($p < 0,001$) entre la leche producida con raciones elaboradas con ensilado de RI y la producida con ensilado de HB; sin diferencias respecto a HBRI. En los AG de cadena media (C14:0 - C17:0) y de cadena larga (C18:0 o más átomos de C), la leche proveniente de las dietas a base de ensilado de RI y HBRI presentó diferencias significativas respecto a la proveniente de ensilado de HB.

Entre los AG de cadena larga, la leche de vacas alimentadas con raciones que incluyeron HB en la dieta presentó mayor contenido en ácido ruménico (C18:2 *cis*-9 *trans*-11) que la leche producida con las otras dos raciones y mayor concentración de ácido vaccénico (C18:1 *trans*-11) que la leche producida con HBRI.

El sumatorio de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) fue mayor ($p < 0,001$) en la leche de vacas alimentadas con raciones a base de ensilado de HB. Los ácidos grasos omega-3 (ω 3), omega-6 (ω 6) y la ratio entre ambos no presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre dietas ya que el 98% de los ω 3 correspondieron al ácido linolénico (C18:3 *cis*-9 *cis*-12 *cis*-15) y el 98% de los ω 6 al ácido linoleico (C18:2 *cis*-9 *cis*-12) los cuales resultaron similares entre tratamientos. Por tanto, la ratio entre ambos contenidos no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$).

Tabla 6.7. Perfil de ácidos grasos (g 100 g⁻¹ de AG) de la leche de vacas Holstein consumiendo raciones totales mezcladas (TMR) ofertada formuladas con ensilado de raigrás italiano, haba forrajera e intercultivo de haba-raigrás.

Perfil de ácidos grasos	TMR			rsd	p
	RI	HB	HBRI		
Caproico (C6:0)	2,35	2,34	2,41	0,253	0,429
Heptanoico/Enántico (C7:0)	0,04 ^a	0,03 ^b	0,03 ^b	0,013	<0,001
Caprílico (C8:0)	1,03	0,97	1,01	0,117	0,155
Nonanoico/Pelargónico (C9:0)	0,04	0,02	0,02	0,013	<0,001
Cáprico (C10:0)	4,00 ^a	3,61 ^b	3,96 ^{ab}	0,452	0,001
Undecanoico (C11:0)	0,11 ^a	0,06 ^b	0,07 ^b	0,041	<0,001
Láurico (C12:0)	4,74 ^a	4,16 ^b	4,55 ^{ab}	0,550	<0,001
Docenoico (C12:1 <i>cis</i> -5)	0,09	0,08	0,09	0,031	0,596
Tridecanoico (C13:0)	0,14	0,11	0,11	0,033	<0,001
Total cadena_corta	12,53^a	11,39^b	12,24^{ab}	1,251	0,001
Mirístico (C14:0)	14,51	13,55	14,15	1,419	0,020
Miristoleico (C14:1 <i>cis</i> -9)	0,92	0,88	0,83	0,158	0,070
Pentadecanoico (C15:0)	1,64 ^a	1,49 ^{ab}	1,43 ^b	0,198	<0,001
Palmitico (C16:0)	40,35 ^a	37,20 ^b	39,89 ^a	3,321	<0,001
Palmitoleaidico (C16:1 <i>trans</i> -9)	0,06 ^b	0,09 ^a	0,05 ^b	0,038	<0,001
Palmitoleico (C16:1 <i>cis</i> -9)	0,84	0,86	0,80	0,126	0,137
Heptadecanoico/Margárico (C17:0)	0,60	0,71	0,61	0,136	0,001
Heptadecenoico (C17:1 <i>cis</i> -10)	0,06 ^a	0,10 ^a	0,08 ^{ab}	0,034	<0,001
Total cadena_media	58,97^a	54,89^b	57,84^a	3,920	<0,001
Estearico (C18:0)	10,37 ^b	12,12 ^a	11,17 ^{ab}	2,039	<0,001
Elaidico (C18:1 <i>trans</i> -9)	0,06	0,05	0,02	0,097	0,293
Transvaccénico (C18:1 <i>trans</i> -11)	1,22 ^b	2,00 ^a	1,32 ^b	0,579	<0,001
Oleico (C18:1 <i>cis</i> -9)	12,24 ^b	14,08 ^a	12,82 ^{ab}	2,168	0,003
Vaccénico (C18:1 <i>cis</i> -11)	0,38 ^{ab}	0,45 ^a	0,31 ^b	0,142	<0,001
Linoleico (C18:2 <i>cis</i> -9,12)	1,87	1,96	1,83	0,349	0,273
Ruménico (C18:2 <i>cis</i> -9 <i>trans</i> -11) (CLA)	1,25 ^b	1,80 ^a	1,26 ^b	0,538	<0,001
Linolénico (C18:3 <i>cis</i> -9,12,15)	0,98	1,08	1,04	0,234	0,237
Araquídico (C20:0)	0,04	0,06	0,05	0,039	0,044
Behenico (C22:0)	<LC	0,01	<LC	0,006	0,121
Araquidónico (C20:4 <i>cis</i> -5,8,11,14)	0,03	0,04	0,03	0,022	0,058
Eicosapentaenoico (C20:5 <i>cis</i> -5,8,11,14,17)	0,01	0,01	0,01	0,010	0,085
Behenico (C22:0)	<LC	0,01	<LC	0,006	0,121
Docosapentaenoico (C22:5 <i>cis</i> -7,10,13,16,19)	0,01	0,01	0,01	0,013	0,177
Total cadena_larga	28,46^b	33,67^a	29,88^b	4,679	<0,001
Σ Saturados (AGS)	79,95 ^a	76,45 ^b	79,46 ^a	2,906	<0,001
Σ Insaturados (AGI)	20,02 ^b	23,50 ^a	20,50 ^b	2,894	<0,001
Σ Moninsaturados (AGMI)	15,87 ^b	18,59 ^a	16,32 ^b	2,435	<0,001
Σ Poliinsaturados (AGPI)	4,15 ^b	4,91 ^a	4,19 ^b	0,906	<0,001
Ratio AGS/AGI	4,08 ^a	3,37 ^b	4,13 ^a	0,772	<0,001
Omega 6 (ω-6)	1,90	2,00	1,86	0,354	0,212
Omega 3 (ω-3)	1,00	1,10	1,06	0,237	0,238
Ratio ω-6/ω-3	2,20	1,93	1,97	0,603	0,215
Ratio Transvaccénico_Vaccénico	2,71 ^b	4,39 ^a	3,59 ^{ab}	1,735	<0,001

RI: TMR elaborada con raigrás italiano de primer corte (100 %); HB: TMR elaborada con ensilado de haba forrajera (100 %); HBRI: TMR elaborada con intercultivo haba-raigrás (60-40 %); rsd: desviación estándar residual.

^{a,b,c} Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de Bonferroni para un nivel de significación de p<0,05.

Los resultados corresponden a la media de los dos ensayos de alimentación realizados (2015 y 2016).

6.4. DISCUSIÓN

Según el Nomenclátor básico de pastos (Ferrer *et al.*, 2001), las “praderas” son cultivos forrajeros constituidos por una mezcla de gramíneas y leguminosas. En Asturias, son habituales las praderas de larga duración, con una vida productiva por encima de los cuatro años y conformadas a base de diferentes proporciones de raigrás inglés (*Lolium perenne* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.) con incorporación de dácilo (*Dactylis glomerata* L.) (Martínez-Fernández *et al.*, 2014). Ferrer (2016), en la definición que hace del término pradera, indica que, con el paso del tiempo, generalmente a partir de los 10 años desde su implantación, las praderas, si no se levantan, pueden “naturalizarse”. Es decir, que las especies sembradas son sustituidas progresivamente por especies espontáneas transformándose así, en sitios húmedos o con riego en “prados” y, en lugares secos en “pastizales”. En este caso, las praderas utilizadas tienen más de 10 años desde su implantación, por lo que pueden considerarse como “prados de pastoreo”.

La composición botánica de los prados utilizados en este trabajo, presentó un porcentaje medio de gramíneas del 77,26%, un 3,91% de leguminosas y un 5,87% de otras familias; el 12,40% restante se atribuyó a restos no identificables y a materia muerta. Según Dietl *et al.* (2009), las praderas poseen una composición botánica equilibrada cuando el porcentaje de gramíneas está entre el 50 y el 70% y el de leguminosas y otras familias entre el 10 y el 30%. Por tanto, según dichos autores, la población de leguminosas presentes en las praderas utilizadas para este estudio, está por debajo del valor óptimo recomendado para esta familia botánica. Estos resultados coinciden con los presentados por Jiménez-Calderón (2017) en praderas colindantes, en las que las leguminosas, representadas en su totalidad por *Trifolium repens* L., constituyeron un 1,33% del total, mientras que el promedio de las gramíneas identificadas fue de un 89,13%. Esta escasa contribución de las leguminosas a la biomasa de las praderas se debe a que el trébol es una especie muy sensible a la competencia por luz y nutrientes (Haynes, 1988) y, por tanto, su establecimiento y mantenimiento para lograr un adecuado equilibrio en la pradera es difícil en regiones del norte de España (Galicia y Cornisa Cantábrica), caracterizadas por climas templados y húmedos y en las que es habitual que la producción de *Trifolium repens* L. en asociación con *Lolium perenne* L. no supere el 25-30% de la producción total de la pradera, lo cual se cifra entre un 10 y un 13% de la materia seca total (Muslera y Ratera, 1984).

El valor nutritivo y energético del pasto fue muy variable entre períodos y ensayos debido, probablemente, a la diferencia fitológica existente entre las parcelas utilizadas. Bruinenberg *et al.* (2002) y Ansquer *et al.* (2004) señalaron que la diversidad florística influye en el valor nutricional de las praderas debido a las diferencias en la composición química y en la digestibilidad de las especies individuales que las conforman y, también, debido a los diferentes estados fenológicos en los que se encuentren las plantas. Además, existen numerosos factores que influyen en la composición botánica de una pradera y, por lo tanto, en el valor nutritivo del pasto (Andueza *et al.*, 2010), como pueden ser el tipo de suelo, la disponibilidad de agua, la variación anual de las condiciones climáticas (Buxton, 1996), el estado nutricional y las prácticas de manejo (Duru *et al.*, 1998; Blackstock *et al.*, 1999). En estudios realizados en estos mismos prados, Morales-Almaráz *et al.* (2010) atribuyó las variaciones encontradas en la composición química del pasto a una lógica en la evolución de la madurez de la planta y/o a la utilización de praderas diferentes en cada período de ensayo, mientras que Jiménez-Calderón (2017) justifica las diferencias observadas a la contribución en porcentaje de la especie dominante.

El perfil lipídico del forraje verde procedente de estos prados de pastoreo ya ha sido bien definido con anterioridad por otros autores (Morales-Almaraz *et al.*, 2010; 2018; Hernández-Ortega *et al.*, 2014; Jiménez-Calderón, 2017). Estos autores coinciden en que los ácidos grasos mayoritarios presentes en dichos forrajes son el ácido palmítico (C16:0), el oleico (C18:1 *cis*-9), el linoleico (C18:2 *cis*-9, *cis*-12) y el linolénico (C18:3 *cis*-9, *cis*-12, *cis*-15) y todos ellos presentan proporciones en torno a 20; 2; 17 y 58 g 100 g⁻¹ de ácidos grasos para cada uno de ellos respectivamente. A causa de la homogeneidad en los resultados obtenidos en estos estudios, se tomó la decisión de no cuantificar nuevamente el contenido de ácidos grasos de los prados utilizados en este ensayo y tomar como referencia los datos aportados por los autores mencionados.

Por otra parte, el pienso suplementario, como cabía esperar en un producto comercial, resultó homogéneo en cuanto a valor nutritivo en los dos años de estudio (años 2015 y 2016) y su contenido en ácidos grasos también ha sido caracterizado por los autores mencionados anteriormente. Se trata de un pienso con un elevado contenido en ácido palmítico, en torno a 44 g 100 g⁻¹ de ácidos grasos, seguido por un 29 y 18 g 100 g⁻¹ de ácido oleico y linoleico respectivamente y una escasa concentración de ácido linoleico, alrededor de 0,3 g 100 g⁻¹ de ácidos grasos.

Las raciones TMR suministradas a las vacas en ambos ensayos fueron formuladas para ser isoproteicas e isoenergéticas en base al contenido en proteína bruta y energía metabolizable de los ensilados descritos en el “Capítulo 5” de esta tesis. En el primer ensayo de alimentación (año 2015), el contenido proteico y energético fue similar en las tres raciones ensayadas. Sin embargo, en el segundo ensayo (año 2016), la mayor cantidad de concentrado utilizado en la ración elaborada con ensilado de RI para alcanzar el mismo nivel de proteína bruta que en las otras raciones, dio como resultado un valor energético ligeramente superior (1,50 vs. 1,39 vs. 1,39 Mcal kg MS⁻¹ para las raciones RI, HB y HBRI respectivamente). Resultados similares fueron observados por Jiménez-Calderón (2017) en raciones elaboradas con ensilado de raigrás italiano comparadas con raciones elaboradas con ensilado de haba y colza en intercultivo. Estas incidencias en la formulación de las raciones fueron debidas a que el haba forrajera es un cultivo más proteico que el raigrás italiano, pero menos energético por lo que fue necesario incluir mayor contenido de dicho ensilado para formular las raciones de una forma balanceada.

El contenido en ácidos grasos presente en las TMR debería ser proporcional al contenido en ácidos grasos de los ensilados utilizados en su elaboración de acuerdo con el porcentaje de ensilado utilizado (ver la Tabla 5.4 del apartado 5.3.3 del Capítulo 5 de esta tesis), pero se observaron ligeras diferencias probablemente derivadas del proceso de elaboración de las raciones. Las diferencias más notables fueron las apreciadas en el contenido de ácido oleico y ácido linolénico. Mientras que el contenido de ácido oleico se vio incrementado en las TMR respecto al observado en el ensilado (1,54; 4,35 y 2,50 g 100 g⁻¹ AG para los ensilados de RI, HB y HBRI respectivamente vs. 12,44; 16,42 y 15,65 g 100 g⁻¹ para las raciones de RI, HB y HBRI respectivamente), el ácido linolénico presentó una importante disminución en su concentración respecto a la observada en el ensilado utilizado para la elaboración de la ración (60,43; 24,06 y 37,99 g 100 g⁻¹ AG para los ensilados de RI, HB y HBRI respectivamente vs. 27,85; 8,23 y 11,80 g 100 g⁻¹ para las raciones de RI, HB y HBRI respectivamente). Tras la apertura del silo durante la alimentación, la exposición al aire y a la luz produce un proceso de oxidación que puede ocasionar pérdidas en el contenido de ácidos grasos insaturados (Kalac y Samková, 2010). En un estudio realizado por de Khan *et al.* (2009) con ensilados de maíz y de hierba, se observaron disminuciones significativas en el contenido de ácido linolénico, linoleico, oleico y en el sumatorio total de ácidos grasos tras ser expuestos a temperatura ambiente durante 24 h. Además, hay que tener en cuenta que la mezcla de los ingredientes de las TMR utilizadas en este estudio fue realizada mediante carro mezclador. Si este procedimiento no se realiza con precaución, puede dar lugar a un calentamiento de los ingredientes utilizados y compuestos termolábiles de las plantas, como los compuestos fenólicos y los ácidos grasos, pueden verse

alterados. En el caso de los ácidos grasos, los ácidos más insaturados son los primeros en sufrir cambios, por lo que el ácido linolénico pudo haber perdido las insaturaciones y adquirir forma de ácido oleico incrementando así el contenido de uno en detrimento del otro.

Las leguminosas, como el haba forrajera, poseen moléculas bioactivas (fenoles totales y taninos condensados) que en algunos trabajos han sido relacionados con la disminución de la ingestión voluntaria. Estudios realizados por Jiménez-Calderón (2017) con raciones elaboradas con un intercultivo de haba-colza, mostraron una reducción significativa en la ingestión voluntaria en comparación con raciones elaboradas con raigrás italiano. Sin embargo, el efecto de los taninos depende de la concentración, y esta a su vez de la especie, variedad y órgano de la planta (Baizán *et al.*, 2018). En este estudio, no se observaron diferencias significativas en el consumo de las raciones que incluyeron ensilado de haba forrajera en la ración en comparación con la ración que incluyó ensilado de raigrás italiano, por tanto, los resultados encontrados en este trabajo inducen a pensar que el efecto depresivo sobre la ingestión en raciones haba-colza pudo ser debido a los glucosinolatos de la colza (Pailan y Singhal, 2007) y no estar relacionado con el contenido de polifenoles del haba forrajera.

La producción de leche de las vacas alimentadas con las raciones elaboradas con ensilado de haba forrajera (HB y HBRI) fue ligeramente inferior, aunque no de forma significativa, que la producción obtenida con raciones a base de ensilado de raigrás. Tampoco se observaron diferencias en la composición fisicoquímica de la leche excepto en la concentración de urea, en la que la leche producida con las raciones elaboradas con el ensilado de leguminosa (HB y HBRI) presentaron un contenido mayor que la leche producida con raciones en base a ensilado de RI. Este hecho podría ser la causa de la menor producción de la leche con estas dietas, ya que la excreción de urea por la leche precisa de energía que puede ser usada en la síntesis de leche (Oltner *et al.*, 1985). Aunque, el contenido en urea de la leche procedente de la ración elaborada con ensilado de HB fue mayor que la de las otras dietas, estos valores se encontraron siempre dentro del rango considerado como óptimo (210 y 320 mg urea L⁻¹) según Salcedo-Díaz y Villar-Bonet (2015). El contenido de urea en la leche es un reflejo del consumo de proteína dietética y del metabolismo ruminal, así como del funcionamiento del hígado y el riñón (Wittwer *et al.*, 1999; Salcedo-Díaz y Villar-Bonet, 2015) de manera que, niveles elevados de este parámetro pueden ser atribuidos a un exceso de proteína en la dieta o a una ineficiente utilización de la misma (Vicente, 2002). Factores como la relación proteína/energía de la dieta o la relación proteína no degradable/degradable en el rumen pueden afectar al contenido de urea en leche (Baker *et al.*, 1995). En un primer momento, un incremento de la urea láctea pueden

indicar una ración desequilibrada (González-Rodríguez y Vázquez-Yañez, 2008) pero, en trabajos similares (Jiménez-Calderón, 2017; de la Torre-Santos *et al.*, 2019) en los que se utilizaron ensilados de leguminosas (haba y guisante) también tuvieron como resultado concentraciones de urea más elevadas que las observadas en la leche producida con ensilados de raigrás italiano, por lo que un nivel alto de urea en la leche también se puede atribuir al uso de ensilados con elevados contenidos en nitrógeno amoniacal.

El porcentaje medio de proteína de la leche presentó valores por debajo del 3,1% recomendado para el pago por calidad, en las tres dietas utilizadas. Estos resultados suelen estar relacionados con bajos aportes de energía. Según Granzin (2004), la ingesta de energía (a diferencia de la ingesta de proteína) es el principal impulsor de la síntesis de proteínas de la leche. Las vacas que se encuentran en un gran balance de energía negativa (por ejemplo, vacas de alta producción alimentadas con pasto y suplementadas con bajos niveles de concentrado) presentan bajas concentraciones de proteína de la leche, entre 2,8 y 2,9%. Los animales usados en estos ensayos se encontraban en el primer y segundo tercio de lactación; cuando los requerimientos son más elevados. Las raciones fueron formuladas para cubrir las necesidades maximizando la proporción de forraje y minimizando la de concentrado. Como la degradación de los concentrados en el rumen incrementa la proporción de propiónico, éste vería reducida su concentración en el rumen con las dietas usadas. Hay una correlación positiva entre la concentración de propiónico y la proteína en la leche (Rook, 1979) debido a que favorece la disponibilidad de aminoácidos. Si un aminoácido no está en cantidad suficiente se limita la síntesis de proteína (Bachman, 1994). Las concentraciones de lactosa, extracto seco magro y células, sin diferencias entre tratamientos, se mantuvieron dentro de los valores recomendados.

La concentración de grasa y de ácidos grasos de la leche depende principalmente de la dieta suministrada a los animales (Dewhurst *et al.*, 2006; Kalac y Samková, 2010; Kliem y Shingfiel, 2016) y posteriormente de la actividad microbiana producida en el rumen de la vaca. Está demostrado que la ingesta de ácidos poliinsaturados presentes en pasto se traduce en concentraciones más altas de ácido oleico, ácido vacénico y ruménico en la grasa de la leche (Walker *et al.*, 2004; Morales-Almaraz *et al.*, 2011). Puesto que todas las vacas del ensayo consumieron el mismo tipo de pasto, las diferencias encontradas en el perfil lipídico pueden atribuirse al tipo de especie suministrada en la TMR.

La leche procedente de vacas alimentadas con raciones a base de ensilado de HB presentó un contenido total de ácidos grasos saturados (AGS) menor que la leche producida con

las otras raciones (RI y HBRI). Esta diferencia fue debida principalmente a que presentó una menor concentración de ácido palmítico, el cual ha sido relacionado con el aumento de colesterol en sangre en humanos (Yu *et al.*, 1995). También se observó menor contenido en otros ácidos grasos relacionados con el riesgo cardiovascular como el ácido láurico (C:12) y el mirístico (C:14), aunque en este último no de forma significativa. De esta manera se produce una reducción en los ácidos de cadena corta y media a favor de ácidos grasos beneficiosos, como el ácido oleico. Este ácido graso es un agente antiaterogénico conocido y promueve efectos positivos en la salud humana (Sales-Campos *et al.*, 2013). Ese hecho concuerda con otros estudios que obtuvieron una proporción creciente de ácidos grasos monoinsaturados (AGMI) y ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) en la leche a expensas de los ácidos cáprico, láurico, mirístico y palmítico cuando las vacas fueron alimentadas con ensilado de leguminosas (trébol rojo) frente a una mezcla de ensilado de fleo y festuca (Vanhatalo *et al.*, 2007) o de ensilado de raigrás (Moorby *et al.*, 2009). La leche producida con raciones a base de ensilado de HB, presentó niveles más altos de AGPI que la leche derivada de las otras dietas, los cuales están considerados beneficiosos para la salud humana por sus propiedades anticancerígenas (Gómez-Cortés *et al.*, 2018), sobretodo el ácido linoleico y el ácido ruménico (C18:2 *cis-9 trans-12*).

En este estudio, al contrario de lo observado por Dewhurst *et al.* (2003a) donde la leche de vacas alimentadas con ensilado de trébol rojo presentó un incremento en el contenido de omega-3 (ácido linolénico) respecto a la de las alimentadas con ensilado de gramíneas, no se apreciaron diferencias significativas entre los tratamientos para el ácido linolénico, probablemente debido a la biohidrogenación de este ácido graso en el rumen. A pesar de este hecho, la leche producida con raciones a base de ensilado de HB mostró una mayor eficiencia de transferencia de este compuesto a la grasa de leche bovina en comparación con las raciones a base de ensilado de RI si tenemos en cuenta que el forraje fresco de RI contenía 65,26 g 100 g⁻¹ AG vs. 48,81 y 31,87 para HBRI y HB respectivamente (ver la Tabla 5.3 del apartado 5.3.3 del Capítulo 5 de la presente tesis). Estos resultados coinciden con estudios previos (Dewhurst *et al.*, 2003a; Vanhatalo *et al.*, 2007) que demostraron que las leguminosas poseen una mayor eficiencia en la transferencia de ácidos grasos poliinsaturados de la dieta a la grasa de leche bovina en comparación con las gramíneas. Estas comparaciones fueron realizadas con distintas especies de trébol (*Trifolium pratense* L., *Trifolium repens* L.) y con veza (*Vicia sativa* L.). En un estudio realizado recientemente por de la Torre-Santos *et al.* (2019), se ha observado que cuando se sustituye el ensilado de raigrás italiano por ensilado de leguminosas, especialmente con haba forrajera, la grasa de la leche tiene una mayor proporción de ácidos grasos insaturados y que, además, la práctica del pastoreo en la alimentación de las vacas influye directamente en

la composición de la leche, mejorando su calidad al disminuir la proporción de ácidos grasos saturados e incrementar el contenido en insaturados, monoinsaturados, poliinsaturados y ácido linoleico conjugado, proporcionando de esta manera un perfil de ácidos grasos más saludable.

Actualmente se sabe que los ácidos grasos esenciales, tanto de la serie omega-6 (especialmente ácido linoleico y araquidónico) y de la serie omega-3 (ácido linolénico, eicosapentaenoico y docohexaenoico) son fundamentales para el desarrollo y el crecimiento y desempeñan un papel clave en la prevención y manejo de enfermedades coronarias, hipertensión, diabetes, artritis, cáncer y otras afecciones inflamatorias y autoinmunes (Simopoulos, 2009). La relación ω -6/ ω -3 en la leche de vaca describe esencialmente las concentraciones de ácido linoleico vs. ácido linolénico, ya que representan los ω -6 y ω -3 más abundantes. Por lo tanto, una relación ω -6/ ω -3 más baja es indicativa de una dieta basada en forraje (Elgersma, 2015) y de un perfil lipídico más saludable. Las recomendaciones de los expertos indican que se deberían consumir una relación de dos partes de omega-6 por cada una de omega-3 (2:1). En este estudio, la relación más baja correspondió a la leche producida con ensilado de HB, aunque sin diferencias significativas respecto a las otras dietas, resultado de la ausencia de diferencias significativas en el ácido linoleico debido a que casi la totalidad de los ácidos grasos omega-3 presentes en la grasa de la leche correspondían al ácido linolénico, no se observaron diferencias significativas entre dietas para estos compuestos, y lo mismo en el caso de los omega omega-6. Estos resultados coinciden con lo observado por Jiménez-Calderón (2017) en los que no se observaron diferencias significativas en las concentraciones individuales en estos ácidos grasos pero los índices de aterogenicidad y de trombogenicidad mostraron un perfil más saludable en leche producida con ensilado de haba colza en intercultivo que la leche producida con ensilado de raigrás italiano.

6.5. CONCLUSIONES

La inclusión de ensilado de haba forrajera en raciones TMR no afectó negativamente a la ingestión voluntaria, ni a la producción y composición química de los componentes de la leche implicados en el pago por calidad respecto a la ración convencional elaborada con ensilado de raigrás italiano.

La alimentación de vacas lecheras con raciones elaboradas a base de ensilado de haba forrajera presentó un contenido en ácido palmítico menor que la leche producida con la ración convencional elaborada con ensilado de raigrás italiano, aumentando el contenido de ácidos grasos mono y poliinsaturados, mostrando un perfil lipídico más saludable para los consumidores.

CAPÍTULO 7

Recapitulación final y futuras líneas de investigación

7. RECAPITULACIÓN FINAL Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. RECAPITULACIÓN FINAL

Como se ha podido observar en el transcurso de los experimentos de la presente tesis, las condiciones meteorológicas y edáficas son dos de los factores limitantes más importantes a nivel agronómico. Aunque todas las especies seleccionadas presentaban requerimientos ambientales similares, el haba forrajera (*Vicia faba* L.) y el trébol violeta (*Trifolium pratense* L.) fueron las alternativas que mostraron una mayor resiliencia, lo que pone de manifiesto la importancia de la selección de especies adaptadas y capaces de sobrellevar las diversas perturbaciones que pueden surgir en el entorno durante la fase de implantación de los cultivos. También se ha podido constatar que una climatología adversa condiciona de forma importante el manejo, impidiendo la entrada de la maquinaria en el momento óptimo de cosecha o contaminando el forraje con tierra, lo cual se vio reflejado en la calidad nutritiva de los forrajes. Debido a esto, y a pesar de saber que el haba forrajera presenta un mayor contenido en proteína bruta que el raigrás en condiciones óptimas, los ensilados de HB y HBRI procedentes de los ensayos de gran parcela no alcanzaron la suficiencia proteica esperada. Aun así, la elevada producción de estos cultivos hizo que el rendimiento medio en proteína por hectárea resultara bastante superior (711 vs. 849 vs. 1242 kg PB ha⁻¹ para RI, HB y HBRI respectivamente), haciendo que la cantidad de concentrado necesaria para elaborar las raciones a base de ensilado de HB y HBRI fuera menor a la necesitada para elaborar las raciones a base de ensilado de RI. Esto implica un ahorro en los costes de alimentación contribuyendo a minimizar la dependencia proteica y mejorando el margen de beneficios de la explotación.

Como ya se ha mencionado, con los cultivos alternativos seleccionados (HB y HBRI) se obtuvieron mayores producciones que con los dos cortes acumulados del RI. Además de concentrar toda la producción en único corte, ésta producción fue obtenida sin necesidad de aportar abono nitrogenado complementario como en el caso del cultivo convencional. Por tanto, el uso de haba forrajera proporciona grandes ventajas económicas y ambientales para la explotación como son la reducción del gasto en fertilizante, de la mano de obra y de la entrada de maquinaria en las parcelas, lo cual, a su vez, conlleva un ahorro en combustible y proporciona beneficios en la salud del suelo al reducirse la compactación derivada del continuo mecanizado.

El manejo sostenible a base de fertilización orgánica (purín de vacuno) y los cultivos con leguminosa (HB y HBRI) ejercieron un efecto positivo sobre la salud del suelo a través de una

mayor abundancia y biodiversidad de la fauna edáfica y la mejora de parámetros importantes de la calidad del suelo como la compactación y la capacidad de infiltración. Por otra parte, el reciclado de los residuos orgánicos generados en la propia explotación ganadera disminuyó el aporte de fertilizantes químicos sin reducir la producción agrícola convirtiéndose en un valioso recurso que permite a la explotación disminuir el gasto en fertilización.

Teniendo en cuenta la importancia económica del uso de ensilados y las pérdidas por deterioro, es importante seleccionar forrajes que posean una buena estabilidad aeróbica durante el periodo de suministro a los animales. Los resultados de este estudio pusieron de manifiesto que el haba forrajera y el intercultivo haba-raigrás poseen mejores condiciones de estabilidad aeróbica respecto al RI, ya que son capaces de mantener los incrementos de pH y temperatura estables durante más tiempo que ensilado el ensilado de RI.

La inclusión de ensilado de haba forrajera en las raciones de vacuno leche no deprimió la ingestión voluntaria y tampoco afectó de forma negativa a la producción ni a la composición de la leche. Por otro lado, la leche de las vacas alimentadas con raciones elaboradas a base de ensilado de haba forrajera presentó un perfil lipídico más cardiosaludable para los consumidores al mostrar menor contenido en ácido palmítico que la leche producida con la ración convencional elaborada con ensilado de raigrás italiano. Además, se ha podido confirmar que el haba forrajera posee una mayor capacidad de transferencia de ácidos grasos poliinsaturados a la leche en comparación con el raigrás italiano.

7.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Gracias a los ensayos realizados en la presente tesis podemos decir que el haba forrajera en monocultivo o en intercultivo con raigrás italiano posee el potencial necesario para sustituir al raigrás italiano y cumplir con los requerimientos de la PAC. Por tanto, las futuras líneas de investigación deberían estar enfocadas en profundizar y/o desarrollar los aspectos más relevantes de dicho cultivo y de la rotación completa del mismo con maíz forrajero, además de la realización de un análisis económico detallado.

Sabemos que el haba forrajera es un cultivo altamente productivo pero que su rendimiento y calidad pueden verse afectados por las condiciones climatológicas. El desarrollo de herramientas de modelización para desarrollar predicciones climáticas a corto (24-72 horas) y medio plazo (hasta 7-15 días) podría ayudar a mejorar algunos puntos clave como la fecha de

siembra, tratamientos fitosanitarios, aplicaciones de herbicidas, cosecha y otros aspectos operativos la explotación agrícola. Por otro lado, la posible alteración de los patrones actuales de temperatura y precipitación derivados del cambio climático hace necesario conocer la respuesta de este cultivo frente al estrés hídrico.

Otra posible línea de investigación sería la relacionada con el estudio de los servicios edáficos y las relaciones del continuo suelo-planta-atmósfera, ya que, en los ensayos realizados para evaluar la salud del agroecosistema, observamos que los indicadores biológicos de calidad del suelo mostraron una mayor rapidez y sensibilidad de respuesta respecto a los indicadores químicos, de manera que estos parámetros pueden ser usados como una herramienta para la toma de decisiones en el manejo y uso del suelo a escala local.

Uno de los múltiples servicios ecosistémicos del haba forrajera es proporcionar hábitat y alimento a los polinizadores. Debido a la importancia de estos insectos para la producción hortícola y forrajera, es necesario desarrollar sistemas de muestreo que permitan caracterizar la biodiversidad taxonómica (abundancia y riqueza de especies) presente en estos cultivos.

En uno de los artículos derivados de esta tesis se cuantificó el contenido de moléculas bioactivas (fenoles totales y taninos condensados) del cultivar “Prothabon” de haba forrajera. Debido a la importancia de estos compuestos secundarios en la alimentación y sanidad de los rumiantes y sus efectos positivos en la calidad del ensilado, sería interesante caracterizar el contenido de dichos compuestos en otras variedades de haba forrajera.

Por último, hemos visto la capacidad del haba forrajera para modificar la composición de la leche y su mayor eficiencia en la transferencia de ácido linolénico respecto al raigrás. Se trata de un ácido graso poliinsaturado esencial (el organismo es incapaz de sintetizarlo por sí mismo y tiene que ser adquirido a través de la dieta) y es el precursor del ácido ruménico el cual presenta un especial interés por parte del consumidor debido a sus propiedades beneficiosas para la salud. Por ello, se deben continuar con este tipo de ensayos con el fin de producir leche naturalmente enriquecida que permita un pago añadido por calidad.

CAPÍTULO 8

Conclusiones

8. CONCLUSIONES

8.1. CONCLUSIONES GENERALES:

A partir del trabajo experimental desarrollado en la presente tesis doctoral y de la evaluación de los resultados obtenidos, las principales conclusiones alcanzadas son las siguientes:

1. Los resultados muestran que la colza forrajera y el nabo francés no son alternativas viables en las condiciones edafoclimáticas ensayadas.
2. Las alternativas forrajeras ensayadas, tanto en monocultivo como asociadas con raigrás italiano y bajo fertilización orgánica, no influyen en el rendimiento ni en la calidad nutritiva del cultivo de maíz que completa la rotación en comparación con los resultados de la rotación clásica raigrás italiano-maíz en condiciones de manejo convencional.
3. El haba forrajera y el trébol violeta y sus intercultivos con raigrás italiano fueron las alternativas que presentaron mejor calidad edáfica.
4. Con el resto de cultivos evaluados y atendiendo a los siguientes criterios: producción, autosuficiencia proteica, ensilabilidad, valor nutritivo y aporte energético, fermentabilidad, resistencia al deterioro aeróbico, perfil de ácidos grasos y perfil edáfico, se concluye que las habas forrajeras en monocultivo o asociadas con raigrás italiano son una clara alternativa al raigrás italiano como cultivo de invierno para rotar con maíz.
5. La asociación leguminosa-raigrás (HBRI) permitió obtener mayores rendimientos que el monocultivo de las respectivas especies que lo conforman (HB y RI), con mayores rendimientos en proteína y energía por ha.
6. Los cultivos alternativos (HB y HBRI) presentaron una mejor ensilabilidad y sus ensilados mejor estabilidad aeróbica que el cultivo convencional (RI) además de un elevado contenido en ácido linoleico. Sin embargo, sus ensilados pueden sufrir una pérdida proteica derivada de una elevada amoniogénesis.

7. El diagnóstico global de salud del agroecosistema fue superior en la parcela con fertilización orgánica e intercultivo HBRI, con una mayor diversidad en macro y mesofauna, lo que a su vez mejoró los parámetros fisicoquímicos del suelo.
8. La inclusión de ensilado de haba forrajera en raciones TMR no afectó negativamente a la ingestión voluntaria, ni a la producción y composición química de los componentes de la leche implicados en el pago por calidad respecto a la ración convencional elaborada con ensilado de raigrás italiano.
9. La alimentación de vacas lecheras con raciones elaboradas a base de ensilado de haba forrajera presentó un contenido en ácido palmítico menor que la leche producida con la ración convencional elaborada con ensilado de raigrás italiano, aumentando el contenido de ácidos grasos mono y poliinsaturados, mostrando un perfil lipídico más saludable para los consumidores.

8.2. CONCLUSIÓN FINAL:

Mediante el presente trabajo se ha demostrado que el uso del haba forrajera en monocultivo o en intercultivo con raigrás italiano son alternativas viables al raigrás italiano para rotar con maíz adecuadas a los requerimientos de la PAC en el uso de cultivos fijadores de nitrógeno, suficiencia proteica y prácticas agrícolas beneficiosas para el clima y el medio ambiente. La integración del ensilado de dichos cultivos en raciones completas mezcladas destinadas a la alimentación de vacuno no afecta negativamente a la ingestión voluntaria de materia seca por parte de las vacas ni a la producción y composición de la leche. Además, la ingesta de raciones a base de ensilado de haba forrajera modifica el perfil lipídico de la leche haciéndolo más saludable al disminuir el contenido en ácidos grasos saturados y aumentar el de ácidos grasos poliinsaturados.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- ADAS. (1985). Compound feed evaluation for the ruminants. Technical Bulletin 85/21. Ministry of Agricultural, Fisheries and Food. Reading, Reino Unido. 2 pp.
- Adesogan A. T., Salawu M. B., Williams S. P., Fisher W. J. y Dewhurst R. J. (2004). Reducing concentrate supplementation in dairy cow diets while maintaining milk production with pea wheat intercrops. *Journal of Dairy Science*, 87: 3398-3406.
- Afif E. (2005). Dinámica del fósforo en suelos calcáreos de áreas mediterráneas: trabajo experimental. Servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo. Oviedo, España. 110 pp.
- AFRC. (1993). Energy and protein requirements of ruminants. Agricultural and Food Research Council. CAB International, Wallingford, Reino Unido.
- Agegnehu G., Ghizaw A. y Sinebo W. (2006). Yield performance and land-use efficiency of barley and fava bean mixed cropping in Ethiopian highlands. *European Journal of Agronomy*, 25 (3): 202-207.
- Ahmed M., Rauf M., Mukhtar Z. y Saeed N.A. (2017). Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing serious threats to environment and human health. *Environmental Science and Pollution Research*, 24: 26983-26987.
- Alonso F. (2017). El Cultivo del maíz. *Campoastur*, 17: 28-33.
- Álvarez-Pinilla A. y Pérez-Méndez J. A. (2010). Acciones de Futuro para el Sector Lechero en la Cornisa Cantábrica. Centro Nacional de Competencia Tecnológica de la Leche. Oviedo, España. 65 pp.
- Andrades M., Moliner A. y Masaguer A. (2015). Prácticas de edafología: métodos didácticos para análisis de suelos. Material Didáctico. Agricultura y Alimentación, 15. Servicio de Publicaciones de la Universidad de la Rioja, Logroño, España. 82 pp.
- Andueza D., Cruz P., Farruggia A., Baumont R., Picard F. y Michalet-Doreau B. (2010). Nutritive value of two meadows and relationships with some vegetation traits. *Grass and Forage Science*, 65: 325-334.
- Angus J.F., Kirkegaard J.A., Hunt J.R., Ryan M.H., Ohlander L. y Peoples M.B. (2015). Break crops and rotations for wheat. *Crop and Pasture Science*, 66: 523-52.
- Ansquer P., Cruz P., Prevot P., Theau J.P., Jouany C. y Duru M. (2004). Are structural plant traits relevant indicators of fertility level and cutting frequency in natural grasslands? *Grassland Science in Europe*, 9: 760-762.
- AOAC. (1984). Official methods of analysis, 14th edition. Ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC, EE.UU. pp. 249-252.

- Arango J. y Fernández B. (2011). Tablero de gestión de la explotación lechera. La nueva reforma de la PAC y la toma de decisiones en las explotaciones lecheras asturianas. Edita: Central Lechera Asturiana. Sociedad Agraria de transformación. Siero, España. 188 pp. ISBN: 978-84-615-4788-3.
- ARC. (1980). The nutrient requirements of farm livestock. N°2, Ruminants. Commonwealth Agricultural Bureaux. Inglaterra. 351 pp.
- Argamentería A., Carballal A., González C., Martínez-Fernández A., de la Roza-Delgado B., Soldado A. y Modroño S. (2013). Variedades de maíz. Actualización año 2012. Informe técnico SERIDA. Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias. Villaviciosa, Asturias, España. 33 pp.
- Argamentería A., Carballal A., González C., Martínez-Fernández A., de la Roza-Delgado B., Soldado A. y Modroño S. (2014). Variedades de maíz. Actualización año 2013. Informe técnico SERIDA. Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias. Villaviciosa, Asturias, España. 33 pp.
- Argamentería A., Carballal A., Martínez-Martínez A., Soldado A., de la Roza-Delgado B., Martínez-Fernández A., del Valle D. y Alperi J. (2012). Variedades de maíz. Actualización año 2011. Informe técnico SERIDA. Consejería de Agroganadería y Recursos Autóctonos del Principado de Asturias. Villaviciosa, Asturias, España. 33 pp.
- Argamentería A., de la Roza B., Martínez-Fernández A., Sánchez L. y Martínez A. (1997). El ensilado en Asturias. Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias. Consejería de Agricultura. 127 pp.
- Arnott G., Ferris C. P. y O'Connell N. E. (2017). Welfare of dairy cows in continuously housed and pasture-based production systems. *Animal*, 11 (2): 261-273
- Atienza S.G. y Rubiales D. (2017). Legumes in sustainable agriculture. *Crop and Pasture Science*, 68 (11), i-ii.
- Bach A., Iglesias C. y Busto I. (2004). Technical note: A computerized system for monitoring feeding behavior and individual feed intake of dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 87: 4207-4209.
- Bachman K.C. (1994). Managing milk composition. University of Florida, Dairy Report: 336-346.
- Báez M., García-Pomar M.I., Louro A. y Castro-Insua J. (2013). Producción y composición química de forraje en rotaciones de maíz con varios cultivos de invierno. En: *Los Pastos: nuevos retos, nuevas oportunidades*. L. Olea *et al.* (Eds). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, Badajoz, España. pp. 187-194.
- Baizán S., Vicente F., Barhoumi N., Feito I., Rodríguez L. y Martínez-Fernández A. (2018). Efecto de la inclusión de ensilado de haba forrajera en la dieta de vacuno lechero sobre la ingestión voluntaria y la producción y composición de la leche. *ITEA*, 114 (4): 353-367.
- Baizán S., Vicente F., González M. A., González C., de la Roza B., Soldado A. y Martínez-Fernández A. (2015). Alternativas forrajeras sostenibles como cultivo invernal en zonas templadas. *Pastos*, 45: 23-32.

- Baizán S., Vicente F., González M.A., González C., de la Roza Delgado B., Soldado A. y Martínez-Fernández A. (2015). Leguminosas forrajeras en monocultivo o en asociación con otras especies como alternativa viable al cultivo invernal de raigrás italiano para rotar con maíz. En: Pastos y forrajes en el siglo XXI. Cifré Llopart *et al.* (Eds). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, Palma de Mallorca, España. pp. 225-231.
- Baker L.D, Ferguson J.D. y Chalupa W. (1995). Responses in urea and true protein of milk to different protein feeding schemes for dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 78: 2424-2434.
- Baldock J.O., Higgs L.R., Paulson W.H, Jacobs J.A. y Schrader W.D. (1981). Legumes and mineral nitrogen effects on crop yields in several crop sequences in the Mississippi Valley. *Agronomy Journal*, 73: 885-890.
- Base de datos meteorológica. Disponible en: <https://datosclima.es/> [Consultado el 10 de diciembre 2018].
- Bauchart D., Verite R. y Remond B. (1984). Long-chain fatty acid digestion in lactating cows fed fresh grass from spring to autumn. *Canadian Journal of Animal Science*, 64 (5): 330-331.
- Bauer A. y Black A.L. (1994). Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. *Soil Science Society of America Journal*, 58 (1): 185-193.
- Baumont R., Bastien D., Féraud A., Maxin G. y Niderkorn G. (2016). Les intérêts multiples des légumineuse fourragères pour l'alimentation des ruminants. *Fourrages*, 227: 171-180.
- Below F. E. (2002). Nitrogen metabolism and crop productivity. *Handbook of plant and crop physiology*, 2: 385-406.
- Blackstock T.H., Rimes C.A., Stevens D.P., Jefferson R.G., Robertson H.J., Mackintosh J. y Hopkins J.J. (1999). The extent of semi-natural grassland communities in lowland England and Wales: a review of conservation surveys 1989-1996. *Grass and Forage Science*, 54: 1-18.
- BOE. (2013). Real Decreto 53/2013, de 1 de febrero, por el que se establecen las normas básicas aplicables para la protección de los animales utilizados en experimentación y otros fines científicos, incluyendo la docencia. *Boletín Oficial del Estado*, 34: 11370-11421.
- BOE. (2014). Real Decreto 1075/2014, de 19 de diciembre, sobre la aplicación a partir de 2015 de los pagos directos a la agricultura y a la ganadería y otros regímenes de ayuda, así como sobre la gestión y control de los pagos directos y de los pagos al desarrollo rural. *Boletín Oficial del Estado*, 307: 103644-103723.
- BOE. (2017). Real Decreto 980/2017, de 10 de noviembre, por el que se modifican los Reales Decretos 1075/2014, 1076/2014, 1077/2014 y 1078/2014, todos ellos de 19 de noviembre, dictados para la aplicación en España de la Política Agrícola Común. *Boletín Oficial del Estado*, 274: 108523-108542.
- Bonjean A. y Le Goffic F. (1999). La cameline- *Camelina sativa* (L.) Crantz: une oportuite pour l'agriculture et l'industrie euroéennes. *OCL*, 6: 28-34.
- Borreani G., Revello-Chion A., Colombini S., Odoardi M., Paoletti R. y Tabacco E. (2009). Fermentative profiles of field pea (*Pisum sativum*), faba bean (*Vicia faba*) and white

- lupin (*Lupinus albus*) silages as affected by wilting and inoculation. *Animal Feed Science and Technology*, 151: 316-323.
- Bot A. y Benites J. (2005). The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production. Rome, Italy: FAO Soil Bulletin 80, Food and Agriculture organization of the United Nations. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-a0100e.pdf> [Consultado el 6 de julio 2018].
- Botana A., Valladares J., Pereira-Crespo S., Díaz N., Resch C., Fernández-Lorenzo B., Dagnac T., Veiga M. y Flores-Calvete G. (2016). Las mezclas de leguminosas anuales pueden mejorar la productividad de la rotación raigrás italiano-maíz forrajero. En: *Innovación sostenible en pastos: hacia una agricultura de respuesta al cambio climático*. M. D. Báez *et al.* (Eds). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, Lugo, España. pp. 87-92.
- Bruinenberg M.H., Valk H.H., Korevaar H. y Struik P.C. (2002). Factors affecting digestibility of temperate forages from semi-natural grasslands. *Grass and Forage Science*, 57: 292-301.
- Butler T.J. y Muir J.P. (2006). Dairy manure compost improves soil and increases tall wheatgrass yield. *Agronomy Journal*, 98: 1090-1096.
- Buxton D.R. (1996). Quality-related characteristics of forages as influenced by plant environment and agronomic factors. *Animal Feed Science and Technology*, 59: 37-49.
- Canals R.M., Peralta J. y Zubiri E. (2009). Flora Pratense y Forrajera Cultivada de la Península Ibérica. Disponible en: <http://www.unavarra.es/herbario/pratenses/htm/inicio.htm> [Consultado el 10 de enero de 2019].
- Caravaca F., Masciandaro G. y Ceccanti B. (2002). Land use in relation to soil chemical and biochemical properties in a semiarid Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, 68: 23-30.
- Carballal A., González C., Modroño S., de la Roza-Delgado B., Soldado A. y Martínez-Fernández A. (2016). Variedades de maíz. Actualización año 2015. Informe técnico SERIDA. Consejería de Desarrollo Rural y Recursos Naturales del Principado de Asturias. Villaviciosa, Asturias, España. 40 pp.
- Cardinale B.J., Wright J.P., Cadotte M.W., Carroll I.T., Hector A., Srivastava D.S., Loreau M. y Weis J.J. (2007). Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104 (46): 18123-18128.
- Cavallarín L., Tabacco E. y Borreani G. (2007). Forage and grain legume silages as a valuable source of proteins for dairy cows. *Italian Journal of Animal Science*, 6: 282-284.
- Chouinard P. Y., Corneau L., Saebo A. y Bauman D. E. (1999). Milk yield and composition during abomasal infusion of linoleic acids in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 82: 2737-2745.
- Christie W.W. (1982). A simple procedure for rapid transmethylation of glycerolipids and cholesterol esters. *Journal of Lipid Research*, 23: 1072-1075.
- Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quéré C., Myneni R.B., Piao S. y Thornton P. (2013). Carbon

- and other biogeochemical cycles. En: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. y Midgley P.M. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE.UU. pp. 465-544.
- CIFA. (2010). El cultivo de la colza en Cantabria. Centro de Investigación y Formación Agrarias. Muriedas, Cantabria. 32 pp.
- Clapham W.M., Foster J.G., Neel J.P.S. y Fedders J.M. (2005). Fatty acid composition of traditional and novel forages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53 (26): 10068-10073.
- Clark S. (2014). Plant guide for white lupine (*Lupinus albus* L.). USDA-NRCS, Big Flats Plant Materials Center, Corning, Nueva York. 6 pp.
- Clemente A. (2016). El año internacional de las legumbres. *Mol* (16): 70-75.
- Copani G., Ginane C., Le Morvan A. y Niderkorn V. (2014). Bioactive forage legumes as a strategy to improve silage quality and minimize nitrogenous losses. *Animal Production Science*, 54: 1826-1829.
- Costa J.L., Aparicio V.C. y Cerda A. (2014). Soil physical quality changes under different management systems after 10 years in Argentinian Humid Pampa. *Solid Earth Discuss*, 6: 2615-2644.
- Crème A., Rumpel C., Gastal F., Gil M.D.L.L.M. y Chabbi A. (2016). Effects of grasses and a legume grown in monoculture or mixture on soil organic matter and phosphorus forms. *Plant and Soil*, 402 (1-2): 117-128.
- Datos climáticos mundiales. Disponible en: <https://es.climate-data.org/> [Consultado el 10 de diciembre de 2018].
- de la Roza-Delgado B., Martínez-Fernández A. y Argamentería-Gutiérrez A. (1999). Estabilidad aeróbica, calidad de los ensilados de raigrás italiano y su respuesta en producción según la naturaleza del aditivo empleado. En: VIII Actas de las Jornadas sobre Producción Animal. ITEA, 20 (2): 526-528.
- de la Roza-Delgado B., Martínez-Fernández A. y Argamentería-Gutiérrez A. (2002). Determinación de materia seca en pastos y forrajes a partir de la temperatura de secado para análisis. *Pastos*, 32: 91-104.
- de la Torre-Santos S., Royo L. J., Martínez-Fernández A. y Vicente F. (2019). Influencia del tipo de ensilado sobre el perfil de ácidos grasos de la leche de vaca con y sin pastoreo. En: AIDA. XVIII Jornadas sobre Producción Animal, Zaragoza, España. pp. 200-202.
- Demant R., Aguilera S. M. y Mora M. L. (1999). Efecto de la aplicación de purines sobre el sistema suelo-planta. *Frontera Agrícola*, 5: 87-94.
- Dewhurst R. J., Fisher W. J., Tweed J. K. S. y Wilkins R. J. (2003a). Comparison of grass and legume silages for milk production. 1. Production responses with different levels of concentrate. *Journal of Dairy Science*, 86 (8): 2598-2611.

- Dewhurst R.J. y King P.J. (1998). Effects of extended wilting, shading and chemical additives on the fatty acids in laboratory grass silages. *Grass and Forage Science*, 53: 219-224.
- Dewhurst R.J., Evans R.T., Scollan N.D., Moorby J.M., Merry R.J. y Wilkins R.J. (2003b). Comparison of grass and legume silages for milk production. 2. *In vivo* and *in sacco* evaluations of rumen function. *Journal of Dairy Science*, 86: 2612-2621.
- Dewhurst R.J., Shingfield K.J., Lee M.R.F. y Scollan N.D. (2006). Increasing the concentrations of beneficial polyunsaturated fatty acids in milk produced by dairy cows in high-forage systems. *Animal Feed Science and Technology*, 131: 168-206.
- Dhiman T. R., Satter L. D., Pariza M. W., Galli M. P., Albright K. y Tolosa M. X. (2000). Conjugated linoleic acid (CLA) content of milk from cows offered diets rich in linoleic and linolenic acid. *Journal of Dairy Science*, 83: 1016-1027.
- Dietl W., Fernández F. y Venegas C. (2009). Manejo sostenible de praderas, su flora y vegetación. Chile: Ministerio de Agricultura, ODEPA. 188 pp.
- Dinic B., Radović J. y Jevtić G. (2010). Procedures for improvement of the quality of fermentation process and increase of nutritive value of silages. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 26 (spec issue): 261-274.
- Doltra J. y Olesen J.E. (2013). The role of catch crops in the ecological intensification of spring cereals in organic farming under Nordic climate. *European Journal of Agronomy*, 44: 98-108.
- Doyle P.T. y Stockdale C.R. (2011). Dairy farm management systems: seasonal, pasture-based, dairy cow breeds. En: *Encyclopedia of Dairy Sciences*. Vol. 2. Fuquay J.W *et al.* (Eds). pp. 29-37.
- Duc G. (1997). Faba bean (*Vicia faba* L.). *Field Crops Research*, 53 (1): 99-109.
- Duke J. A. (1981). Handbook of legumes of world economic importance. Plenum Press, Nueva York, EE.UU. 345 pp.
- Duru M., Balent G., Gibon A., Magda D., Theau J.P., Cruz P. y Jouany C. (1998). Fonctionnement et dynamique des prairies permanentes. Exemple des Pyrénées Centrales. *Fourrages*, 153: 97-113.
- El Bassam N. (2010). Handbook of bioenergy crops: a complete reference to species, development and applications. Earthscan, Londres, Reino Unido. 545 pp. ISBN: 978-1-84407-854-7.
- Elgersma A. (2015). Grazing increases, the unsaturated fatty acid concentration of milk from grass-fed cows: A review of the contributing factors, challenges and future perspectives. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117 (9): 1345-1369.
- Elgersma A., Tamminga S. y Ellen G. (2006). Modifying milk composition through forage. *Animal Feed Science and Technology*, 131: 207-225.

- FAO. (2017). Future of food and agriculture - Trends and Challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia. 163 pp. ISBN 978-92-5-109551-5.
- FEGA. (2019). Declaraciones obligatorias del sector de leche. Ministerio de Pesca, Agricultura y Alimentación. España. 19 pp.
- Feng S., Lock A. L. y Garnsworthy P. C. (2004). Technical note: A rapid lipid separation method for determining fatty acid composition of milk. *Journal of Dairy Science*, 87: 3785-3788.
- Fernández-Lorenzo B., Castro P., Flores G., Arráez A.G. y Valladares J. (2004). Estimación de la composición química del guisante (*Pisum sativum* L.) y triticale (x *Triticosecale* Wittm.) mediante NIRS. En: Pastos y Ganadería Extensiva. García-Criado B. *et al.* (Eds). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, Salamanca, España pp. 285-290.
- Ferrer C., San Miguel A. y Olea L. (2001). Nomenclátor básico de pastos en España. *Pastos*, XXXI (1): 7-44.
- Ferrer C. (2016). Diccionario de Pascolología. Aspectos ecológicos, botánicos, agronómicos, forestales, zootécnicos y socio-económicos de los pastos. Fundación Conde del Valle de Salazar, Madrid. 933 pp. ISBN: 978-84-96442-67-2.
- Ferreras L. A., Toresani S., Faggioli V. y Galarza C. (2015). Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un Argiudol de la Región Pampeana Argentina. *Spanish Journal of Soil Science*, 5 (3): 227-242.
- Finn J.A., Kirwan L., Connolly J., Sebastià M.T, Helgadottir A. *et al.* (2013). Ecosystem function enhanced by combining four functional types of plant species in intensively managed grassland mixtures: a 3-year continental-scale field experiment. *Journal of Applied Ecology*, 50: 365-375.
- Flores G., Amor J., Resch C. y González-Arráez A. (2000). Valor nutritivo del ensilaje de hierba en las explotaciones ganaderas de Galicia. *Pastos*, 30: 149-191.
- Flores G., Díaz N., Díaz D., Valladares J., Pereira-Crespo S., Fernández-Lorenzo B., Resch C., Rodríguez-Diz X. y Piñeiro J. (2013). Evaluación de cultivares de raigrás italiano e híbrido como cultivo de invierno para ensilar en primavera. *Pastos*, 43 (1): 20-34.
- Flores G., Martínez-Fernández A., Doltra J., García A. y Eguinoa P. (2017). Estructura y sistemas de alimentación de las explotaciones lecheras de Galicia, Cornisa Cantábrica y Navarra. Informe técnico. Ed. INTIA. 52 pp.
- Foster J.L., Carter J.N., Sollenberger L.E., Blount A.R., Myer R.O., Maddox M.K., Phatak S.C y Adesogan A.T. (2011). Nutritive value, fermentation characteristics and *in situ* disappearance kinetics of ensiled warm-season legumes and bahiagrass. *Journal of Dairy Science*, 94 (4): 2042-2050.
- Francis A. y Warwick S. I. (2009). The biology of Canadian weeds. 142. *Camelina alyssum* (Mill.) Thell.; *C. microcarpa* Andr. ex DC.; *C. sativa* (L.) Crantz. *Canadian Journal of Plant of Science*, 89 (4): 791-810.
- Frutos P., Moreno-Gonzalo J., Hervás G., García U., Ferreira L.M.M., Celaya R., Toral P.G., Ortega-Mora L.M., Ferre I. y Osoro K. (2008). Is the anthelmintic effect of heather

- supplementation to grazing goats always accompanied by anti-nutritional effects? *Animal*, 2: 1449-1456.
- Fumagalli P., Comolli R., Ferrè C., Ghiani A., Gentili R. y Citterio S. (2014). The rotation of white lupin (*Lupinus albus* L.) with metal-accumulating plant crops: A strategy to increase the benefits of soil phytoremediation. *Journal of Environmental Management*, 145: 35-42.
- Gee G. y Bauder J.W. (1986). Particle-size analysis. En: *Methods of soil analysis: Part 1*. Klute A. (Ed.). American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, EE.UU. pp. 383-411.
- Gianfreda L. y Ruggiero P. (2006). Enzyme activities in soil. En: *Nucleic acids and proteins in soil*. Nannipieri P. y Smalla K. (Eds). Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 257-311.
- Gómez-Cortés P., Juárez M. y de la Fuente M. A. (2018). Milk fatty acids and potential health benefits: An updated vision. *Trends in Food Science and Technology*, 81: 1-9.
- González-Rodríguez A. y Vázquez-Yáñez O.P. (2008). Utilización del contenido de urea en leche en el diagnóstico de la alimentación del ganado lechero. Revisión. En: *Pastos, clave en la gestión de los territorios: integrando disciplinas*. Fernández-Rebollo P. *et al.* (Eds). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, Córdoba, España. pp. 453-459.
- González-Hidalgo J. C., Brunetti M. y De Luis M. (2010). Precipitation trends in Spanish hydrological divisions, 1946-2005. *Climate Research*, 43: 215-228.
- Grant R.J. (1991). G91-1034 Evaluating the Feeding Value of Fibrous Feeds for Dairy Cattle. Material histórico del Universidad de Nebraska-Lincoln Extensión 437. Disponible en: <http://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/437> [Consultado el 7 de septiembre de 2018].
- Granzin B. (2004). Low milk protein concentrations: nutritional causes and cures. Disponible en: <https://www.dpi.nsw.gov.au/animals-and-livestock/dairy/feed/research-results/milk-protein> [Consultado el 22 de abril de 2019].
- Gugel R. K. y Falk K.C. (2011). Agronomic and seed quality evaluation of *Camelina sativa* in western Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 86 (84): 1047-1058.
- Hauggaard-Nielsen H., Jornsgaard B., Kinane J. y Jensen E. (2008). Grain legume-cereal intercropping: the practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23: 3-12.
- Hawke J. C. (1973). Lipids. En: *Chemistry and Biochemistry of Herbage Vol. I*. Butler G. W. y Bailey R. W. (Eds.). Academic Press, Londres. pp. 213-263.
- Haynes R. J. (1988). Competitive aspects of the grass-legume association. En: *Advances in Agronomy*, 33: 227-262.
- Helgadóttir Á., Suter M., Gylfadóttir T. Ó., Kristjánadóttir T. A. y Lüscher A. (2018). Grass-legume mixtures sustain strong yield advantage over monocultures under cool maritime growing conditions over a period of 5 years. *Annals of Botany*, 122 (2): 337-348.

- Hernández-Ortega M., Martínez-Fernández A., Soldado A., González A., Arriaga-Jordán C. M., Argamentería A., de la Roza-Delgado B. y Vicente F. (2014). Effect of total mixed ration composition and daily grazing pattern on milk production, composition and fatty acids profile of dairy cows. *Journal of Dairy Research*, 81 (4): 471-478.
- Hervé B.D. y Vidal B.S. (2008). Plant biodiversity and vegetation structure in traditional cocoa forest gardens in southern Cameroon under different management. *Biodiversity and Conservation*, 17 (8): 1821-1835.
- Hesterman O.B. (1988). Exploiting forage legumes for nitrogen contribution in cropping systems. En: *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*. Hargrove W.L. (Ed). ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, EE.UU. pp. 155-166.
- Hoffman W.S. (1937). A rapid photoelectric method for the determination of glucose in blood and urine. *The Journal of Biological Chemistry*, 120: 51-55.
- Huggins D.R. y Reganold J.P. (2008). Agricultura sin labranza. *Investigación y Ciencia*, 384: 66-73.
- Ibañez J.J. (2007). Exploración del suelo por las raíces III. Encharcamientos. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/03/13/61193> [Consultado el 4 de octubre de 2018].
- Intxaurrendieta J.M., Mangado J.M., Lasarte J.M., Pérez P., Mújica I. y Erburu J.A. (2012). Gestión técnico-económica de explotaciones de rumiantes en Navarra. Evolución y perspectivas. En: *Nuevos retos de la ganadería extensiva: un agente de conservación el peligro de extinción*. Canals y San Emeterio (Eds). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, Pamplona, España. pp. 265-285.
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: The Physical Science Basis*. En: *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. y Midgley P.M. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE.UU. 1535 pp.
- Jackson L.E., Wyland L. J. y Stivers L. J. (1993). Winter cover crops to minimize nitrate losses in intensive lettuce production. *Journal of Agricultural Science*, 121 (1): 55-62.
- Jansen P. C. M. (2006). *Lupinus albus* L. Disponible en: https://www.prota4u.org/database/pr_otav8.asp?h=M4&t=Lupinus%20Calbus&p=Lupinus%20albus#Synonyms [Consultado el 10 de enero de 2019].
- Jensen E. S., Peoples M. B., Boddey R. M., Gresshoff P. M., Hauggaard-Nielsen H., Alves B. J. y Morrison M. J. (2011). Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (2): 329-364.
- Jiménez-Calderón J. D., Martínez-Fernández A., Prospero-Bernal F., Velarde-Guillén J., Arriaga-Jordán C. M. y Vicente F. (2018). Using manure as fertilizer for maize could improve sustainability of milk production. *Spanish Journal of Agricultural Research*, Volume 16, Issue 1, e0601. <https://doi.org/10.5424/sjar/2018161-9329>.

- Jiménez-Calderón J. D., Vicente F., Benaouda M., Soldado A. y Martínez-Fernández A. (2014). Fava bean-rapeseed intercrop as a sustainable alternative to Italian ryegrass: production, forage quality and soil fertility evolution. *The Future of European Grasslands*, 587.
- Jiménez-Calderón J.D., Martínez-Fernández A., Benaouda M. y Vicente F. (2017). A winter intercrop of faba bean and rapeseed for silage as a substitute for Italian ryegrass in rotation with maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64: 983-993.
- Jiménez-Calderón J. D. (2017). Producción sostenible de leche de vaca mediante pastoreo y cultivos forrajeros obtenidos con fertilización orgánica. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, España. 216 pp.
- Jolliffe P.A. (1997). Are mixed populations of plant species more productive than pure stands? *Oikos*, 80: 595-602.
- Junta de Extremadura. (1992). Interpretación de análisis de suelos, foliar y agua de riego. Consejo de abonado (normas básicas). Mundi-Prensa, Madrid, España. 280 pp.
- Kadzere C.T., Murphy M.R., Silanikove N. y Maltz E. (2001). Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livestock Production Science*, 77: 59-91.
- Kalac P. y Samková E. (2010). The effects of feeding various forages on fatty acid composition of bovine milk fat: A review. *Czech Journal of Animal Science*, 55: 521-537.
- Khan N.A., Cone J.W. y Hendriks W.H. (2009). Stability of fatty acids in grass and maize silages after exposure to air during the feed out period. *Animal Feed Science and Technology*, 154: 183-192.
- Khan N.A., Cone J.W., Fievez V. y Hendriks W.H. (2011). Stability of fatty acids during wilting of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.): effect of bruising and environmental conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91: 1659-1665.
- Kirkegaard J.A. (2014). From canola roots to curbing cancer- A fascinating journey into brassica's beneficial bioactives. 5th International Symposium of Biofumigation. *Aspects of Applied Biology*, 126: 1-3.
- Kirkegaard J.A. y Sarwar M. (1998). Biofumigation potential of brassicas I. Variation in glucosinolate profiles of diverse field-grown brassicas. *Plant Soil*, 201:71-89.
- Kirkegaard J.A., Christen O., Krupinsky J. y Layzell D.B. (2008). Break crop benefits in temperate wheat production. *Field Crops Research*, 107: 185-95.
- Kliem K. E. y Shingfield K. J. (2016). Manipulation of milk fatty acid composition in lactating cows: Opportunities and challenges. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 118 (11): 1661-1683.
- Klute A. (1986). Nitrogen-total. En: *Methods of soil analysis: Part 1*. Klute A. (Ed.). American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, EE.UU. pp. 595-624.
- Köpke U. y Nemecek T. (2010). Ecological services of faba bean. *Field Crops Research*, 115 (3): 217-233.

- Kung L., Taylor C.C., Lynch M.P. y Neylon J. M. (2003). The effect of treating alfalfa with *Lactobacillus buchneri* 40788 on silage fermentation, aerobic stability, and nutritive value for lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 86: 336-343.
- Lambers H., Bishop J. G., Hopper S. D., Laliberté E. y Zúniga-Feest A. (2012). Phosphorus-mobilization ecosystem engineering: the roles of cluster roots and carboxylate exudation in young P-limited ecosystems. *Annals of Botany*, 110 (2): 329-348.
- Lange R., Schumann W., Petrzika M., Busch H. y Marquard R. (1995). Glucosinolate in Leindottersamen. *Fat Science Technology*, 97: 146-152.
- Ledgard S. F. y Steele K. W. (1992). Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. *Plant and Soil*, 141 (1-2): 137-153.
- Lemke R.L., Zhong Z., Campbell C.A. y Zentner R.P. (2007). Can pulse crops play a role in mitigating greenhouse gases from North American agriculture? *Agronomy Journal*, 99: 1719-1725.
- Li L., Yang S., Li X., Zhang F. y Christie P. (1999). Interspecific complementary and competitive interactions between maize and fava bean. *Plant and Soil*, 212 (2): 105-114.
- Liu M., Gong J.R., Pan Y., Luo Q.P., Zhai Z.W., Xu S. y Yang L.L. (2016). Effects of grass-legume mixtures on the production and photosynthetic capacity of constructed grasslands in Inner Mongolia, China. *Crop and Pasture Science*, 67 (11): 1188-1198.
- Lock A. L. y Garnsworthy P. C. (2003). Seasonal variation in milk conjugated linoleic acid and delta (9)-desaturase activity in dairy cows. *Livestock Production Science*, 79: 47-59.
- Lombardi D., Vasseur E., Berthiaume R., De Vries T.J. y Bergeron R. (2015). Feeding preferences and voluntary feed intake of dairy cows: Effect of conservation and harvest time of birdsfoot trefoil and chicory. *Journal of Dairy Science*, 98: 7238-7247.
- Lopes T., Hatt S., Xu Q., Chen J., Liu Y. y Francis F. (2016). Wheat (*Triticum aestivum* L.) based intercropping systems for biological pest control. *Pest Management Science*, 72 (12): 2193-2202.
- Luo S., Yu L., Liu Y., Zhang Y., Yang W., Li Z. y Wang J. (2016). Effects of reduced nitrogen input on productivity and N₂O emissions in a sugarcane/soybean intercropping system. *European Journal of Agronomy*, 81: 78-85.
- Lüscher A., Müller-Harvey I., Soussana J.F., Rees R.M. y Peyraud J.L. (2014). Potential of legume-based grassland-livestock systems in Europe: a review. *Grass and Forage Science*, 69: 206-228.
- Macon B., Sollenberger L. E., Moore J. E., Staples C. R., Fike J. H. y Portier K. M. (2003). Comparison of three techniques for estimating the forage intake of lactating dairy cows on pasture. *Journal of Animal Science*, 81: 2357-2366.
- MAFF. (1984). Energy allowances and feeding systems for ruminants, 2nd ed. Reference Book 433. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Londres, Reino Unido. 85 pp.

- Maloney T. S., Silveira K. G. y Oplinger E. S. (1999). Rotational vs. nitrogen-fixing influence of soybean on corn grain and silage yield and nitrogen use. *Journal of production agriculture*, 12 (2): 175-187.
- Mangado J. M., Oiarbide J., Barbería A. y Granada A. (2009). Eficiencia y efecto residual del nitrógeno contenido en el purín de vacuno de leche aportado sobre prados de ambiente atlántico. En: *La multifuncionalidad de los pastos: producción ganadera sostenible y gestión de los ecosistemas*. R. Reiné *et al.* (Eds). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos. Huesca, España. pp. 205-212.
- MAPA. (1994). Métodos oficiales de análisis. Tomo III. Secretaría General Técnica del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. pp.39-84.
- MAPA. (2019). Informe de coyuntura del sector vacuno de leche. Subdirección General de Productos Ganaderos, Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 31 pp.
- Martínez-Fernández A. (1995). Determinaciones analíticas para el conocimiento del valor nutritivo de un alimento. Importancia de la preparación de la muestra para su análisis. *Nuevas tendencias en pastos y productos ganaderos*. China E.A y Barquin A. (Eds). Piensos Biona. Tenerife, España. pp. 130.
- Martínez-Fernández A. (2003). Ensilabilidad de especies pratenses en Asturias y su interacción con el uso de aditivos. Tesis doctoral. Departamento de Biología de Organismos y Sistemas. Universidad de Oviedo. Asturias, España. 450 pp.
- Martínez-Fernández A. (2016). Leguminosas forrajeras adaptadas a las condiciones agroclimáticas de la Cornisa Cantábrica y destinadas a la alimentación de rumiantes. XIV Jornadas Técnicas de Vacún de Leite. Seragro, Lugo, España. pp.6-12.
- Martínez-Fernández A. y Argamentería-Gutiérrez A. (2013). Recomendaciones para la fertilización de praderas y cultivos forrajeros anuales en zonas templado húmedas. *Afriga*, 102: 100-110.
- Martínez-Fernández A., Argamentería A. y de la Roza-Delgado B. (2014). Manejo de forrajes para ensilar. Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario. Villaviciosa, España. 280 pp. ISBN: 978-84-617-3234-0.
- Martínez-Fernández A., Baizán S., Jiménez-Calderón J.D, González C y Carballal A. (2018). Protocolos de muestreo para la predicción del rendimiento de forrajes y cultivos forrajeros. *Vaca Pinta*, 5: 74-80.
- Martínez-Fernández A., Carballal A., González C., de la Roza-Delgado B., Soldado A., Modroño S. y Argamentería-Gutiérrez A. (2015). Variedades de maíz. Actualización año 2014. Informe técnico SERIDA. Consejería de Desarrollo Rural y Recursos Naturales del Principado de Asturias. Villaviciosa, Asturias, España. pp. 36.
- Martínez-Fernández A., Carballal-Samalea A., de la Roza-Delgado B., Soldado-Cabezuelo A., Modroño-Lozano S., Argamentería-Gutiérrez A. (2011). Ensayos de variedades de maíz para ensilar en Asturias (1996-2011). Diferencias entre variedades actuales y obsoletas y su relación con la venta de semillas. *Pastos* 41 (2): 211-227.

- Martínez-Fernández A., de la Roza Delgado B., Modroño-Lozano S. y Argamentería A. (2008). Producción y contenido en principios nutritivos de prados, praderas y de la rotación raigrás italiano-maíz en la rasa marítima centro-oriental de Asturias. *Pastos*, XXXVIII (II): 187-224.
- Martínez-Fernández A., de la Roza-Delgado B. y Soldado A. (2016a). Toma de muestras e indicadores de calidad en ensilados. *Afriga*, 124: 76-85.
- Martínez-Fernández A., Soldado A., de la Roza-Delgado B., Vicente F., González-Arrojo M. A. y Argamentería A. (2013). Modelling a quantitative ensilability index adapted to forages from wet temperate areas. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11: 455-462.
- Martínez-Fernández A., Vicente F., Baizán S. y Barhoumi N. (2017a). Las leguminosas forrajeras: un valor añadido en la alimentación de vacas lecheras en la Cornisa Cantábrica. *Mundo Ganadero*, 276: 27-34.
- Martínez-Fernández A., Vicente F., Baizán S., Barhoumi N. (2017b). Interés agronómico de la inclusión de las habas forrajeras en las raciones de rumiantes en la Cornisa Cantábrica. *Afriga*, 131: 60-66.
- Martínez-Fernández A., Vicente F., de la Roza-Delgado B., Soldado A., García J., Alonso J. M. y Peláez M. (2016b). Importancia del uso de aditivos en la calidad y estabilidad de los ensilados de leguminosas. En: *Innovación sostenible en pastos: hacia una agricultura de respuesta al cambio climático*. M. D. Báez *et al.* (Eds). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, Lugo, España. pp. 87-92.
- Martínez-Fernández, A. y de la Roza Delgado, B. (1997). Poder contaminante de los efluentes de ensilados de hierba y raigrás italiano según materia seca del forraje inicial y aditivo utilizado. *Actas XXXVII Reunión Científica de la SEEP*. Sevilla, España. pp. 199-204.
- McAllister T. A., Feniuk R., Mir Z., Mir P., Selinger L.B. y Cheng K.J. (1998). Inoculants for alfalfa silage: Effects on aerobic stability, digestibility and the growth performance of feedlot steers. *Livestock Production Science*, 53: 171-181.
- Mehlich A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15 (2): 1409-1416.
- Migoya J.A. y Fernández-Fano. (2017). EL sector productor de leche en Asturias, un acercamiento a sus cifras. *Fundación Caja Rural de Gijón*, España. 78 pp.
- Miguelañez R. (2017). La alimentación animal necesita proteína vegetal. Disponible en: http://www.euroganaderia.eu/ganaderia/reportajes/la-alimentacion-animal-necesita-proteina-vegetal_2069_11_3242_0_1_in.html [Consultado el 2 de julio 2018].
- Mijangos I., Albizu I., Martín I., Anza M., Mendarte S., Epelde L. y Garbisu C. (2012). Tarjetas de salud de los agroecosistemas-ecosistemas pastorales. Disponible en: <http://www.soilmontana.com/wp-content/uploads/2011/12/FICHAS-CARPETA-OK-traz.pdf> [Consultado el 15 de diciembre de 2018].
- Mijangos I., Becerril J. M., Albizu I., Epelde L. y Garbisu C. (2009). Effects of glyphosate on rhizosphere soil microbial communities under two different plant compositions by

- cultivation-dependent and-independent methodologies. *Soil Biology and Biochemistry*, 41 (3): 505-513.
- Mijangos I., Vicente F., Modroño S., Anza M., Garbisu C. y Martínez-Fernández A. (2015). Diagnóstico comparativo de la salud agroecosistémica bajo diferentes sistemas de abonado para el cultivo de maíz. En: *Pastos y forrajes en el siglo XXI*. Cifré Llompart et al. (Eds). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, Palma de Mallorca, España. pp. 217-224.
- Miñarro M. (2014). Contribución de los insectos a la polinización del manzano. *Fruticultura*, 37: 18-27.
- Mohamad L. (2012). Cómo evitar fermentaciones indeseables en silajes de pasturas. Disponible en: <https://www.forrattec.com.ar/newsletter/forrattec-news-bb-12-29-2012.html> [Consultado el 23 de enero de 2019].
- Monti M., Pellicanò A., Santonoceto C., Preiti G. y Pristeri A. (2016). Yield components and nitrogen use in cereal-pea intercrops in Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 196: 379-388.
- Moorby J.M., Lee M.R.F., Davies D.R., Kim E.J., Nute G.R., Ellis N.M. y Scollan N.D. (2009). Assessment of dietary ratios of red clover and grass silages on milk production and milk quality in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 92: 1148-1160.
- Morales-Almaráz E., de la Roza B., González A., Soldado A., Rodríguez M.L., Peláez M. y Vicente F. (2011). Effect of feeding system on unsaturated fatty acid level in milk of dairy cows. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 26 (39): 224-229.
- Morales-Almaráz E., de la Roza-Delgado B., Soldado A., Martínez-Fernández A., González A., Domínguez-Vara I.A. y Vicente F. (2018). Parity and grazing-time effects on milk fatty acid profile in dairy cows. *Animal Production Science*, 58 (7): 1233-1238.
- Morales-Almaráz E., Soldado A., González A., Martínez-Fernández A., Domínguez-Vara I., de la Roza-Delgado B. y Vicente F. (2010). Improving the fatty acid profile of dairy cow milk by combining grazing with feeding of total mixed ration. *Journal of Dairy Research*, 77 (2): 225-230.
- Moran J. P., Weinberg Z. G., Ashbell G., Hen Y. y Owen T. R. (1996). A comparison of two methods for the evaluation of the aerobic stability of whole crop wheat silage. *International Silage Conference*, Vol. 11. pp. 162-163.
- Morand-Fehr P. y Tran G. (2001). La fraction lipidique des aliments et les corps gras utilisés en alimentation animale. *Productions Animales*, 5 (14): 285-302.
- Morra M.J y Kirkegaard J.A. (2002). Isothiocyanate release from soil-incorporated Brassica tissues. *Soil Biology and Biochemistry*, 34: 1683-1690.
- Muchow R. (1998). Nitrogen utilization efficiency in maize and grain sorghum. *Field Crops Research*, 56: 209-216.
- Muehlbauer F. y Tullu A. (1997). *Vicia faba* L. New Crop Factsheet, Purdue University, Center new crops and plants products. Disponible en:

- <https://hort.purdue.edu/newcrop/CropFactSheets/fababean.html> [Consultado el 10 de enero de 2019].
- Mueller-Harvey I. (2006). Unravelling the conundrum of tannins in animal nutrition and health. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86: 2010-2037.
- Multari S., Stewart D. y Russell W. R. (2015). Potential of fava bean as future protein supply to partially replace meat intake in the human diet. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14 (5): 511-522.
- Muslera E. y Ratera C. (1984). Praderas y forrajes. Producción y aprovechamiento. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 674 pp. ISBN: 84-7114-133-7.
- N'Dayegamiye A., Whalen J.K., Tremblay G., Nyiraneza J., Grenier M., Drapeau A. y Bipfusuba M. (2015). The benefits of legume crops on corn and wheat yield nitrogen nutrition, and soil properties improvement. *Agronomy Journal*, 107: 1653-1665.
- NRC. (1989). Nutrient requirements of dairy cattle. 6th revised edition. Update 1989. National Academy Press, Washington, DC. pp. 168.
- NRC. (2001). Nutrient requirements of dairy cattle. 7th revised edition. National Research Council, National Academy Press, Washington, DC. pp. 381.
- Oliveira J.A., Afif E. y Mayor M. (2006). Análisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado. Ediciones de la Universidad de Oviedo. Asturias. 159 pp.
- Oltner R., Emanuelson M. y Wiktorsson H. (1985). Urea concentrations in milk in relation to milk yield, live weight, lactation number and amount and composition of feed given to dairy cows. *Livestock Production Science*, 12 (1): 47-57.
- Pahlow G., Rammer C., Slottner D. y Tuori M. (2002). Ensiling of legumes. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft*, 234: 27-30.
- Pailan G.H y Singhal K.K. (2007). Effect of dietary glucosinolates on nutrient utilization, milk yield and blood constituents of lactating goats. *Small Ruminant Research*, 71: 31-37.
- Palmquist D. L. y Jenkins T. C. (2003). Challenges with fats and fatty acids methods. *Journal of Animal Science*, 81: 3250-3254.
- Pansu M. y Gautheyrou J. (2006). Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods. Springer. Heidelberg, Alemania. 993 pp. ISBN-10 3-540-31210-2; ISBN-13 978-3-540-31210-9.
- Paul E. A. (1984). Dynamics of organic matter in soils. *Plant and Soil*, 76: 275-285.
- Paz-Ferreiro J., Trasar-Cepeda C., Leirós M.C., Seoane S. y Gil-Sotres F. (2007). Biochemical properties of acid soils under native grassland in a temperate humid zone. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50: 537-548.
- Peeters A., Parente G. y Le Gall A. (2006). Temperate Legumes: key-species for sustainable temperate mixtures. *Grassland Science in Europe*, 11: 205-219.

- Peltonen-Sainio P. y Niemi J.K. (2012). Protein crop production at the northern margin of farming: to boost, or not to boost. *Agricultural and food Science*, 21: 370-383.
- Peoples M. B., Hauggaard-Nielsen H. y Jensen E. S. (2009). The potential environmental benefits and risks derived from legumes in rotations. *Agronomy Monograph*, 52: 349-385.
- Pereira S., Flores G., González-Arráez A., Valladares J. y Fernández-Lorenzo B. (2009). Variación del valor nutritivo de variedades de guisante para forraje en función de la fecha de corte. En: *La multifuncionalidad de los pastos: producción ganadera sostenible y gestión de los ecosistemas*. Reiné R. *et al.* (Eds). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, Huesca, España. pp. 367-374.
- Perramon B., Bosch-Serra A.D., Domingo F. y Boixadera J. (2016). Organic and mineral fertilization management improvements to a double-annual cropping system under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 76: 28-40.
- Pilgerman A. L., Sands D. C., Boss D., Dale N., Wichman D., Lamb P., Lu Ch., Barrows R., Kirkpatrick M., Thompson B. y Johnson D. L. (2007). *Camelina sativa*, a Montana omega-3 and fuel crop. En: *Issues new crops and new uses*. Janick J. y Whipkey A. (Eds). ASHS Press, Alexandria, VA. EE.UU. pp. 129-131.
- Piñeiro J. y Pérez M. (1992). Mezclas pratenses para la Epaña húmeda. Hoja divulgativa 8/92 HD. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 45 pp.
- Piñeiro J., Díaz N. y Pérez M. (2001). Raigrás italiano. *Agricultura*, 828: 437-443.
- Playne M.J. y McDonald P. (1966). The buffering constituents of herbage and of silage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 17: 264-268.
- Porta-Casanellas J., López-Acevedo Reguerín M. y Roquero de Laburu C. (2003). *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 929 pp. ISBN: 9788484761488.
- Porta J., López M. y Rodríguez R. (1986). *Técnicas y experimentos en edafología*. Edita: Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Cataluña, Lleida, España. 282 pp. ISBN: 84-600-4341-X.
- Powlson D.S., Brookes P. y Christensen B.T. (1987). Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 19: 59-164.
- Preissel S., Reckling M., Schläfke N. y Zander P. (2015). Magnitude and farm economic value of grain legume pre-crop benefits in Europe: a review. *Field Crops Research*, 175: 64-79.
- Putnam D.H., Budin J.T., Field L.A. y Breene W.M. (1993). Camelina: A promising low-input oilseed. En: *New crops*. Janick J. y Simon E. (Eds). Wiley, Nueva York. EE.UU. pp. 314-322.
- R Core Team. (2017). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <https://www.r-project.org/> [Consultado el 25 de octubre de 2018].

- Ramírez-Bahena M. H., Peix A., Velázquez E. y Bedmar E. J. (2016). Historia de la investigación en la simbiosis leguminosa-bacteria: una perspectiva didáctica. *Arbor*, 192 (779): a319.
- Reddy P.P. (2016). Soil Organic matter. En: Sustainable Intensification of crop production. Reddy P.P. (Ed). Springer, Berlin, Alemania. pp. 157-173.
- Ren T., Wang J., Chen Q., Zhang F. y Lu S. (2014). The effects of manure and nitrogen fertilizer applications on soil organic carbon and nitrogen in a high-input cropping system. *PloS one*, 9 (5): e97732.
- Riveros E. y Argamentería A. (1987). Métodos enzimáticos de la predicción de la digestibilidad *in vivo* de la materia orgánica de forrajes. I. Forrajes verdes. II. Henos. III. Ensilados y pajas. *Avances en Producción Animal*, 12: 49-75.
- Rochinotti D. (1998). Model components of forage-fed cattle systems: Energy expenditure of grazing cattle and prediction of intake in dairy cows. University of Florida, Gainesville. pp. 187.
- Rochon J. J., Doyle C. J., Greef J. M., Hopkins A., Molle G., Sitzia M., Scholefield D. y Smith C. J. (2004). Grazing legumes in Europe: a review of their status, management, benefits, research needs and future prospects. *Grass and Forage Science*, 59 (3): 197-214.
- Rook J. A. F. (1979). The role of carbohydrate metabolism in the regulation of milk production. *Proceedings of the Nutrition Society*, 38 (3): 309-314.
- Roscher C., Thein S., Weigelt A., Temperton V.M., Buchmann N. y Schulze E.D. (2011). N₂ fixation and performance of 12 legume species in a 6-year grassland biodiversity experiment. *Plant and Soil*, 341: 333-348.
- Rubiales D. (2016). El año en que las Naciones Unidas nos recuerdan la importancia de las leguminosas en la dieta y en la agricultura. *Arbor*, 192 (779): a310.
- Salcedo-Díaz G. y Villar-Bonet A. (2015). Interpretación del contenido de urea en leche. Claves para su minimización en las explotaciones de Cantabria. CIFA, Gobierno de Cantabria, Santander, España. 58 pp.
- Sales-Campos H., de Souza P. R., Peghini B. C., da Silva J. S. y Cardoso C. R. (2013). An overview of the modulatory effects of oleic acid in health and disease. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 13: 201-210.
- Santiago C., Vicente F. y Martínez-Fernández A. (2015). Procedencia de los alimentos utilizados en las explotaciones de vacuno lechero del principado de Asturias. AIDA. XVI Jornadas sobre Producción Animal, Tomo I, 102-104.
- Schlamberger G., Wiedemann S., Viturro E., Meyer H. H. D. y Kaske M. (2010). Effects of continuous milking during the dry period or once daily milking in the first 4 weeks of lactation on metabolism and productivity of dairy cows. *Journal of dairy science*, 93 (6): 2471-2485.
- Schlesinger W.H. (2009). On the fate of anthropogenic nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106: 203-208.

- Schulte E.E. y Hopkins B.G. (1996). Estimation of organic matter by weight loss-on-ignition. En: Soil organic matter: Analysis and interpretation. En: Magdoff F.R. *et al.* (Eds.). Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, EE.UU. pp. 21-31.
- Schuster A. y Friedt W. (1998). Glucosinolate content and composition as parameters of quality of Camelina seed. *Industrial Crops and Products*, 7: 297-302.
- Shingfield K.J., Chilliard Y., Toivonen V., Kairenius P. y Givens D.I. (2008). Trans Fatty Acids and Bioactive Lipids in Ruminant Milk. En: *Bioactive Components of Milk*. Springer, Nueva York. pp. 3-65.
- Shipitalo M.J. (2002). Structure and earthworms. En: *Encyclopedia of Soil Science*. Lal R. (Ed). Marcel Dekker, Nueva York, EE.UU. pp. 1255-1258.
- Simopoulos A.P. (2009). Omega-6/omega-3 essential fatty acids: biological effects. *World Review of Nutrition and Dietetics Home*, 99: 1-16.
- Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios. Disponible en: <https://sig.mapama.gob.es/siga/> [Consultado el 20 de diciembre de 2018].
- Smith J., Pearce B.D. y Wolfe M.S. (2013). Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? *Renewable Agriculture and Food Systems*, 28 (1): 80-92.
- Socarrás A. (2013). Mesofauna edáfica: indicador biológico de la calidad del suelo. *Pastos y Forrajes*, 36 (1): 5-13.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 372 pp.
- Soilmontana. (2012). Informe de creación de las TSA. Tarjetas de Salud de los Agroecosistemas. Disponible en: <http://www.soilmontana.com/src/uploads/2011/12/Proceso-de-creaci%C3%B3n-de-las-TSA.pdf> [Consultado el 30 de enero 2019].
- St. Luce M., Grant C.A., Zebarth B.J., Ziadi N., O'Donovan J.T. y Blackshaw R.E. (2015). Legumes can reduce economic optimum nitrogen rates and increase yields in a wheat-canola cropping sequence in western Canada. *Field Crops Research*, 179: 12-25.
- Stagnari F., Maggio A., Galieni A. y Pisante M. (2017). Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4 (1): 2.
- Sturludóttir E., Brophy C., Bélanger G., Gustavsson A. M., Jørgensen M., Lunnan T. y Helgadóttir Á. (2014). Benefits of mixing grasses and legumes for herbage yield and nutritive value in Northern Europe and Canada. *Grass and forage science*, 69 (2): 229-240.
- Tobia C., Villalobos E., Rojas A., Soto H. y Moore K. J. (2008). Nutritional value of soybean (*Glycine max* L. Merr.) silage fermented with molasses and inoculated with *Lactobacillus brevis* 3. *Livestock Research for Rural Development*, 20 (7): 1-9.
- Tosti G. y Guiducci M. (2010). Durum wheat-faba bean temporary intercropping: Effects on nitrogen supply and wheat quality. *European Journal of Agronomy*, 33 (3): 157-165.

- Trasar-Cepeda C., Leiros M.C., Seoane S. y Gil-Sotres F. (2008). Biochemical properties of soils under crop rotation. *Applied Soil Ecology*, 39: 133-143.
- Valladares J. (2015). Ventajas de la rotación de leguminosas con maíz y girasol. Disponible en: <http://www.campogalego.com> [Consultado el 26 de octubre de 2018].
- Van Ranst G., Fievez V., De Riek J. y Van Bockstaele E. (2009). Influence of ensiling forages at different dry matters and silage additives on lipid metabolism and fatty acid composition. *Animal Feed Science and Technology*, 150: 62-74.
- Van Soest P. V., Robertson J. B. y Lewis B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74 (10): 3583-3597.
- Vance C.P., Uhde-Stone C. y Allan D.L. (2003). Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a non-renewable resource. *New Phytologist*, 157 (3): 423-447.
- Vanhatalo A., Kuoppala K., Toivonen V. y Shingfield K.J. (2007). Effects of forage species and stage of maturity on bovine milk fatty acid composition. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 108: 856-867.
- Vázquez D., García M.I., Báez D. y García V. (2017). Interpretación del análisis de suelo para un fertilización racional del maíz forrajero. *Afriga*, 128: 44-57.
- Vázquez I. y García E. (2018). Estructura productiva y económica de las explotaciones lecheras cántabras en el actual escenario poscuotas. *Vaca Pinta*, 5: 58-62.
- Vicente F. (2002). Informe técnico I. Relación entre la concentración de urea en leche y el manejo nutricional del ganado vacuno lechero. Serie Guías Agroganaderas 2ª Ed. SERIDA. KRK Ediciones. Oviedo, Asturias, España. 29 pp.
- Waghorn G. (2008). Beneficial and detrimental effects of dietary condensed tannins for sustainable sheep and goat production-progress and challenges. *Animal Feed Science and Technology*, 147: 116-139.
- Walker G.P., Dunshea F.R. y Doyle P.T. (2004). Effects of nutrition on the production and composition of milk fat and protein: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*, 55: 1009-1028.
- Ward M.H. (2009). Too much of a good thing? Nitrate from nitrogen fertilizers and cancer. *Reviews on Environ Health*, 24: 357-363.
- Weinberg Z.G., Ashbell G., Hen Y. y Azrieli A. (1993). The effect of applying lactic acid bacteria at ensiling on the aerobic stability of silages. *Journal of Applied Bacteriology*, 75: 512-518.
- Weissbach F. (1999). Consequences of grassland intensification for ensilability and feeding value of herbage. En: *Contributions of Grassland and Forage Research to the development of Systems of Sustainable Land Use*. Institute of Crop and Grassland Science of the Federal Agriculture Research Centre (FAL), Braunschwig, Alemania. pp. 41-53.
- Wilkinson M. (1987). *Silage UK*. 4ª ed. Chalcombe Publications. Lincoln, Reino Unido. 146 pp.

- Wittwer F.G, Gallardo P., Reyes J. y Opitz H. (1999). Bulk milk urea concentrations and their relationship with cow fertility in grazing dairy herds in Southern Chile. *Preventive Veterinary Medicine*, 38: 159-166.
- Yang B., Chen H., Stanton C., Ros R.P. Zhang H, Chen Y.Q. y Chen W. (2015). Review of the roles of conjugated linoleic acid in health and disease. *Journal of functional foods*, 15: 314-325.
- Yu S., Derr J., Etherton T.D. y Kris-Etherton P.M. (1995). Plasma cholesterol-predictive equations demonstrate that stearic acid is neutral and monounsaturated fatty acids are hypocholesterolemic. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 61: 1129-1139.
- Zubr J. (1997). Oil-seed crop: *Camelina sativa*. *Industrial crops and products*, 6 (2): 113-119.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

I. PUBLICACIONES EN REVISTAS DE IMPACTO (JRC) O CON EVALUACIÓN PREVIA (PEER REVIEW)

ITEA (2018), 114 (4): 353-367

Efecto de la inclusión de ensilado de haba forrajera en la dieta de vacuno lechero sobre la ingestión voluntaria y la producción y composición de la leche

S. Baizán¹, F. Vicente¹, N. Barhoumi¹, I. Feito², L. Rodríguez² y A. Martínez-Fernández^{1,*}

¹ Área de Nutrición, Pastos y Forrajes. Servicio de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA). 33300. Villaviciosa (Asturias), España

² Programa de Investigación Forestal. Servicio de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA). Finca Experimental La Mata. 33825. Grado (Asturias), España

*Autor para correspondencia: admartinez@serida.org

Resumen

Se cuantificó el contenido de compuestos secundarios (fenoles totales y taninos condensados) del haba en monocultivo, del raigrás italiano en monocultivo y del intercultivo de haba y raigrás, desde forraje verde hasta su inclusión como ensilado en raciones unifeed para vacas lecheras. Se evaluó el efecto de la inclusión de estos ensilados sobre la ingestión voluntaria y sobre la producción y composición química de leche. Para ello, se asignaron al azar 3 raciones unifeed formuladas con ensilado de haba (60% de la materia seca de la ración), raigrás italiano (46%) e intercultivo haba-raigrás (52%), a 9 vacas frisonas distribuidas en 3 grupos siguiendo un diseño en cuadrado latino de 3x3. El haba en monocultivo fue el forraje más rico en compuestos secundarios. La concentración de dichos compuestos disminuyó con los procesos de prehenificado y ensilado y se diluyó en la ración con la inclusión de nuevos ingredientes hasta no mostrar diferencias significativas entre dietas. Los valores de ingestión de materia seca de raciones no presentaron diferencias significativas entre dietas (10,29; 10,24 y 10,78 kg de materia seca d⁻¹ para haba, intercultivo de haba-raigrás y raigrás italiano respectivamente). Se observaron diferencias estadísticas en la producción de leche en beneficio de las vacas alimentadas con raciones a base del ensilado de raigrás italiano (P<0,001). La presencia de haba en la ración mejoró significativamente la composición en grasa y proteína de la leche, de manera que al corregir la producción de leche por grasa se anularon las diferencias entre dietas. La presencia de haba en la ración indujo un mayor contenido en urea de la leche.

Palabras clave: leguminosas, fenoles totales, taninos condensados, producción láctea.

Pastos (2015), 45 (2): 23-32

Alternativas forrajeras sostenibles como cultivo invernadero en zonas templadas

Silvia Baizán González, Fernando Vicente Mainar, M^a Amelia González Arrojo, Consuelo González García, Begoña de la Roza Delgado, Ana Soldado Cabezuelo y Adela Martínez Fernández*

Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA). Apdo.13. 33300 Villaviciosa (España)

*Autor para correspondencia: admartinez@serida.org

Resumen

Siguiendo la tendencia actual en Europa de dirigir las explotaciones de vacuno de leche hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental, se investiga en busca de alternativas al raigrás italiano para rotar con maíz, que mantengan o superen sus niveles de productividad, aumenten el contenido en proteína y en ácidos grasos poliinsaturados, que ensilen sin dificultad y, además, disminuyan los costes de producción del conjunto de la rotación. En este trabajo se evaluaron tres leguminosas forrajeras (haba forrajera, altramuz blanco y trébol violeta) en monocultivo o en asociación con raigrás italiano o con otras especies (nabo francés y colza) y manejadas con criterios de sostenibilidad ambiental, como alternativas al monocultivo invernadero de raigrás en manejo convencional, en un sistema rotacional de dos cultivos por año con el maíz como cultivo de verano. Como diseño experimental se utilizó un ensayo en parcela dividida con tres repeticiones durante dos años consecutivos. Los resultados muestran que la colza no es una especie viable en suelos de textura franco arcillosa, independientemente de las condiciones termoplumiométricas. El haba forrajera en monocultivo o asociada con raigrás italiano en condiciones de manejo sostenible es una alternativa viable como cultivo de invierno, ya que presenta producciones, rendimientos en materia orgánica digestible y energía comparables a los del raigrás italiano, con mayor rendimiento proteico y buena ensilabilidad y con la ventaja añadida de ser aprovechados en un solo corte, reduciendo los costes de producción. La asociación haba – raigrás italiano presenta mayor contenido en ácido linoleico ($p < 0,001$) que el raigrás italiano.

Palabras clave: producción forrajera, leguminosas, fertilización orgánica, calidad nutritiva, ácidos grasos.

II. COMUNICACIONES A CONGRESOS

II.I. Internacionales:

- Andueza D., **Baizán S.**, Picard F., Pourrat J. y Maxin G. 2018. Effect of selective herbicides on the effective degradability of nitrogen of forages issued from two permanent grasslands across the first growth cycle. 10th International Symposium on the Nutrition of Herbivores. Del 2 al 6 de septiembre de 2018. Clermont-Ferrand (Francia). En: R. Baumont *et al.* (eds.) Herbivore nutrition supporting sustainable intensification and agro-ecological approaches. pp. 571. Póster.

(Colaboración derivada de la estancia en el INRA de Clermont-Ferrand en 2016)

- **Baizán S.**, Vicente F., Soldado A., Llano P. y Martínez-Fernández A. 2018. Influence of faba bean (*Vicia faba* L.) silage on milk fatty acid profile of dairy cows. 27th General Meeting of EGF. Del 17 al 21 de junio de 2018. Cork (Irlanda). En: B. Horan *et al.* (eds.) Sustainable meat and milk production from grasslands. pp. 422-424. Póster.

- **Baizán S.**, Vicente F., Jiménez-Calderón J.D., Modroño S. y Martínez-Fernández A. 2017. Walking towards precision farming through the yield accurate estimation of winter crops. 11th European Conference on Precision Agriculture. Del 16 al 20 de julio de 2017. Edimburgo (Reino Unido). Póster.

- **Baizán S.**, Vicente F., Soldado A., Modroño S. y Martínez-Fernández A. 2016. Nutritive and fermentative quality and aerobic stability of silages made from winter forage legumes. Del 4 al 8 de septiembre de 2016. 26th General Meeting of EGF. Trondheim (Noruega). En: Höglind *et al.* (eds). The multiple roles of grassland in the European bioeconomy. pp. 242-244. Póster.

II.II. Nacionales:

- Salcedo G., Jiménez J.D., Martínez-Fernández A., **Baizán S.**, Vicente F. 2019. Balance nitrogenado del suelo en las explotaciones lecheras asturianas según la tipología de alimentación. 58^a Reunión Científica de la SEP. Del 8 al 11 de abril de 2019. Sevilla (España). En: servicios ecosistémicos de los sistemas pastorales. Libro de resúmenes. pp. 125. Comunicación oral.

- Salcedo G., Jiménez J.D., Martínez-Fernández A., **Baizán S.**, Vicente F. 2019. Balance nitrogenado en las explotaciones lecheras asturianas según la tipología de alimentación. 58^a Reunión Científica de la SEP. Del 8 al 11 de abril de 2019. Sevilla (España). En: servicios ecosistémicos de los sistemas pastorales. Libro de resúmenes. pp. 81. Comunicación oral.

- Salcedo G., Jiménez J.D., Martínez-Fernández A., **Baizán S.**, Vicente F. 2019. Emisiones de carbono en las explotaciones lecheras asturianas según la tipología de su alimentación. VII Workshop Remedia. Del 27 al 28 de marzo de 2019. Lugo (España). En: Los sistemas agroforestales como solución al cambio climático. Mosquera M.R. *et al.* (eds). Actas del VII Workshop Remedia. pp. 14. Comunicación oral.

- Abou el Qassim L., Vicente F., de la Torre S., Jiménez-Calderón J.D., **Baizán S.**, Soldado A., Martínez-Fernández A. y Royo, L.J. 2018. ¿Es posible certificar la leche producida en ecológico utilizando microARN? XIX Reunión Nacional de Mejora Genética Animal. Del 14 al 15 de junio de 2018. León (España). Póster.

- **Baizán S.**, Vicente F. y Martínez-Fernández A. 2018. Haba forrajera en monocultivo o asociada con raigrás italiano: rendimiento y calidad de sus ensilados. 57ª Reunión Científica de la SEP. Del 25 al 29 de junio de 2018. Teruel (España). Comunicación oral. En: S. Roig y O. Barrantes (eds.). Pastoralismo y Vías Pecuarias. Conectando Tradición e Innovación. pp. 478-486. Comunicación oral.
- **Baizán S.**, Vicente F., Oliveira J.A., Afif E., Palencia P. y Martínez-Fernández A. 2017. Influencia del manejo sobre la salud de un suelo agrícola según la valoración de diferentes servicios edáficos. XXXI Reunión Nacional de Suelos. Del 6 al 9 de junio de 2017. Madrid (España). En: Libro de resúmenes. pp. 30. Póster.
- **Baizán S.**, Martínez-Fernández A. y Vicente F. 2017. Evaluación del ensilado de haba forrajera como alternativa al ensilado de raigrás italiano en la alimentación de vacuno lechero. XVII Jornadas sobre Producción Animal. Del 30 al 31 mayo de 2017. Zaragoza (España). En: Actas de las XVII Jornadas sobre Producción Animal. pp. 123-125. Comunicación oral.
- Barhoumi N., **Baizán S.**, Vicente F., Rodríguez L., Feito I. y Martínez-Fernández A. 2017. Efecto sobre la ingestión voluntaria del contenido en componentes secundarios en raciones de vacuno lechero. XVII Jornadas sobre Producción Animal. Del 30 al 31 mayo de 2017. Zaragoza (España). En: Actas de las XVII Jornadas sobre Producción Animal. pp. 144-146. Comunicación oral.
- **Baizán S.**, Oliveira J.A., Vicente F., González C. y Martínez-Fernández A. 2017. Cambios en las propiedades de un suelo agrícola en función del cultivo y el tipo de fertilización. 56ª Reunión Científica de la SEEP. Del 25 al 28 de abril de 2017. Barcelona (España). En: Bartolomé *et al.* (eds). Renaturalización vs. Ruralización (Rewilding vs. Re-farming). pp. 77-83. Comunicación oral.
- **Baizán S.**, Vicente F, Celis D., Salvador Loreto I, González C, Modroño S. y Martínez-Fernández A. 2016. En un sistema de rotación anual de dos cultivos ¿influyen las leguminosas forrajeras de invierno en el rendimiento y la calidad del maíz forrajero? Del 26 al 29 abril de 2016. 55ª Reunión Científica de la SEEP. Lugo - A Coruña (España). En: Báez Bernal *et al.* (eds). Innovación Sostenible en Pastos: Hacia una Agricultura de Respuesta al Cambio Climático. pp. 99-104. Comunicación oral.
- **Baizán S.**, Vicente F, Oliveira J.A., Afif E., Mijangos I. y Martínez-Fernández A. 2015. Impacto del tipo de abonado sobre las características de suelos agrícolas destinados a la producción de forrajes. Del 7 al 11 de septiembre de 2015. XXX Reunión Nacional de Suelos de la SECS. Granada (España). En: Resúmenes de la comunicación. pp. 7. Póster.
- **Baizán S.**, Vicente F., González M.A, González C., de la roza Delgado B., Soldado y Martínez-Fernández A. 2015. Leguminosas forrajeras en monocultivo o en asociación con otras especies como alternativa viable al cultivo invernal de raigrás italiano para rotar con maíz. Del 14 al 17 de abril de 2015. 54ª Reunión Científica de la SEEP. Palma de Mallorca (España). En: Cifré Llompart *et al.* (eds). Pastos y forrajes en el siglo XXI. pp. 225-231. Comunicación oral.

III. ARTÍCULOS DIVULGATIVOS:

- Carballal A., **Baizán S.**, Soldado A., Modroño S., Piñeiro I., Cueto C. y Martínez-Fernández A. 2019. Maíz forrajero en Asturias. Evaluación de variedades (1996-2018). Vaca Pinta, 9: 94-112.
- Martínez-Fernández A., Baizán S., Jiménez-Calderón J.D, González C. y Carballal A. 2018. Protocolos de muestreo para la predicción del rendimiento de forrajes y cultivos forrajeros. Vaca Pinta, 5: 74-80.
- Carballal A., González C., **Baizán S.**, Modroño S., Soldado A. y Martínez-Fernández A. 2018. Maíz forrajero en Asturias. Evaluación de variedades (1996-2017). Vaca Pinta, 2: 84-95.
- Martínez-Fernández A., Vicente F., **Baizán S.** y Barhoumi N. 2017. Interés agronómico de la inclusión de las habas forrajeras en las raciones de rumiantes en la Cornisa Cantábrica. Afriga, 131: 88-96.
- Martínez-Fernández A., Vicente F, **Baizán S.** y Barhoumi N. 2017. Las leguminosas forrajeras: un valor añadido en la alimentación de vacas lecheras en la Cornisa Cantábrica. Mundo Ganadero, 276: 27-34.
- Carballal A., González C., Modroño S., **Baizán S.**, Becerril M.N., de la Roza B., Soldado A. y Martínez-Fernández A. 2017. Maíz forrajero en Asturias. Evaluación de variedades (1996-2016). Afriga, 128: 60-72.
- Martínez-Fernández A., **Baizán S.** y González C. 2017. Alternativas para el control de malas hierbas en el cultivo del maíz. Afriga, 128: 94-100.

IV. INFORMES TÉCNICOS:

- Carballal A., **Baizán S.**, González C., Soldado A., Modroño S., Piñeiro I., Cueto C. y Martínez A. Evaluación de variedades de maíz (1996-2018). Actualización año 2018. 2019. Informe técnico SERIDA. Consejería de Desarrollo Rural y Recursos Naturales del Principado de Asturias. Villaviciosa, Asturias, España. pp. 48.
- Carballal A., González C., **Baizán S.**, Modroño S., Soldado A. y Martínez A. Variedades de maíz (1996-2017). Actualización año 2017. 2018. Informe técnico SERIDA. Consejería de Desarrollo Rural y Recursos Naturales del Principado de Asturias. Villaviciosa, Asturias, España. pp. 47.
- Carballal A., González C., Modroño S., de la roza Delgado B., Soldado A., **Baizán S.**, Nalleli M. y Martínez-Fernández A. Variedades de maíz. Actualización año 2016. 2017. Informe técnico SERIDA. Consejería de Desarrollo Rural y Recursos Naturales del Principado de Asturias. Villaviciosa, Asturias, España. pp. 48.

V. JORNADAS DE DIFUSIÓN:

- Salcedo G., Jiménez J.D., Martínez-Fernández A., **Baizán S.** y Vicente F. 2019. Jornada divulgativa "Huella de carbono en la producción de la leche en Asturias". 14 de febrero de 2019. Colunga (Asturias).