

Documento de Trabajo 18/02



El Potencial de Mitigación de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de Origen Agrario en Aragón

Safa Baccour, Jose Albiac y Taher Kahil

Departamento de Economía Agraria
Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (CITA-
Gobierno de Aragón)



Para obtener copias de este Documento de Trabajo contactar:

José Albiac
Unidad Economía Agraria
CITA-DGA
Avenida de Montañana 930
50.059 Zaragoza
España

Correo electrónico: maella@unizar.es
Teléfono: +34 976716351
Fax: +34 976716335

Este trabajo forma parte del proyecto INIA2014-00050-00-00 “La gestión del regadío ante la escasez de agua, las sequías y el cambio climático” financiado en parte con fondos FEDER

Resumen

El cambio climático representa una seria amenaza para la sociedad humana en las próximas décadas, y constituye una importante externalidad negativa de las actividades económicas de la población mundial. La contaminación antropogénica está alterando la integridad de la naturaleza y puede provocar modificaciones irreversibles. El sector agrario es uno de los sectores que genera emisiones significativas de gases de efecto de invernadero (GEI) como consecuencia de la expansión de la agricultura intensiva en recursos naturales, capital y otros inputs que genera daños ambientales cada vez mayores. Pero el sector agrario también ofrece oportunidades de bajo coste para mitigar las emisiones GEI y proteger el medio ambiente mediante su potencial de mitigación y fijación de carbono de la atmosfera. La contaminación difusa del sector agrario es un problema complejo que se caracteriza por la dificultad de identificar y controlar la localización y el volumen de la carga de emisiones en el origen y en el medio ambiente. Esta contaminación está afectando los sistemas naturales y humanos, empeorando la calidad del agua y del aire, modificando los hábitats de las especies animales y vegetales y provocando su degradación o extinción. Para poder resolver los problemas de las emisiones GEI es necesario diseñar políticas de mitigación basadas en la cooperación de todos los agentes y los grupos de interés, ya que la sostenibilidad medioambiental no puede lograrse sin acción colectiva.

Este trabajo consiste en la estimación del balance de emisiones GEI del sector agrario en Aragón, el análisis económico y ambiental de las distintas medidas de mitigación de las emisiones GEI, así como la consideración de las perspectivas de evolución futura de la agricultura aragonesa bajo distintos escenarios de políticas de mitigación. El análisis del esfuerzo de mitigación examina los efectos de las medidas individuales, y del conjunto de medidas teniendo en cuenta sus interacciones. La herramienta de análisis se basa en la estimación del coste-eficiencia de las medidas, lo que permite elaborar la curva de costes de reducción marginal (MACC) de las emisiones.

Los resultados muestran que las emisiones del sector agrario en Aragón alcanzan los 4,1 MtCO₂e y se concentran en las comarcas de Monegros (14%), Cinco Villas (11%), La Litera (9%) y Hoya de Huesca (6%). Los bosques aragoneses son importantes sumideros de carbono, con una captura que alcanza los 3 MtCO₂e y que se concentra en las comarcas de Sobrarbe, Ribagorza, Jacetania, Guadar y Cinco villas. La mayor parte del carbono la fijan los pinares y los encinares. Las especies forestales en Aragón generan unos beneficios ambientales por la captura de carbono de unos 116 M€. El potencial de reducción de las medidas si se tiene en cuenta su interacción es un 10% menor que la suma del potencial de mitigación de cada medida tomada de forma individual. En general la interacción entre las medidas disminuye la magnitud de la reducción que se obtiene con la medida tomada de forma individual, por lo que disminuye la eficiencia de costes conforme se introducen sucesivas medidas adicionales. La combinación eficiente de

medidas, tanto considerando o no considerando la interacción, incluye las siguientes medidas: ajuste de la fertilización nitrogenada, sustitución de la fertilización mineral por la orgánica, laboreo mínimo, rotación de cultivos con leguminosas, cultivos cubierta para los herbáceos, disminución de la proteína en la dieta del porcino, y cambio del manejo forestal. El potencial de reducción de la mejor combinación de medidas aumenta conforme se incrementa el coste social del carbono, al entrar medidas adicionales. Los resultados también indican que las emisiones GEI pueden alcanzar los 5,2 MtCO₂e en 2050 si no se adopta ninguna medida, pero pueden reducirse hasta 1,7 MtCO₂e si se adoptan todas las medidas. Estos resultados pretenden apoyar los esfuerzos de mitigación en la región y servir de guía para el diseño e implementación de las estrategias de mitigación.

Summary

Climate change represents a serious threat to human societies in the coming decades and constitutes an important negative externality from the economic activities of the human population. Anthropogenic pollution is altering the integrity of nature and can cause irreversible changes. The agricultural sector generates significant emissions of greenhouse gases (GHG), which result from the expansion of intensive agriculture with a very high use of natural resources, capital and other inputs. This intensive agriculture is contribution to feed the expanding world population, but with increasing environmental damages. However, the agricultural sector offers low-cost opportunities to mitigate GHG emissions compared to other sectors of the economy and protect the environment through its potential to abate GHG emissions and to capture carbon in vegetation and soil sinks. Diffuse pollution in the agricultural sector is a complex problem characterized by the difficulty of identifying and controlling the location and volume of emission loads both at the source and in the environment. These emissions are affecting natural and human systems, worsening the quality of water and air, modifying the habitats of animal and plant species and causing their degradation or extinction. To address the impacts of climate change, it is necessary to design mitigation policies based on the cooperation of all stakeholders, since more sustainability outcomes cannot be achieved without collective action.

This study aims to estimate the balance of GHG emissions in the agricultural sector of Aragón, and to examine the economic and environmental effects of different mitigation measures of GHG emissions, as well as the analysis of the future evolution of agriculture in Aragón under different scenarios of land use change and mitigation policy implementation. The analysis of mitigation effort examines first the effects of individual, and then the effects all measures taken jointly by considering their interactions. The analysis is based on the estimation of the cost-efficiency of measures, which is used to develop the marginal reduction cost curve (MACC) of emissions.

The results show that emissions from the agricultural sector in Aragón reach 4,1 MtCO_{2e} and are concentrated in the counties of Monegros (14%), Cinco Villas (11%), La Litera (9%) and Hoya de Huesca (6%). The forests in Aragón are important carbon sinks, with a carbon capture of 3 MtCO_{2e}. This carbon capture concentrates in the counties of Sobrarbe, Ribagorza, Jacetania, Guadar and Cinco villas. Most of the carbon is fixed by pine forests and holm oaks. The forests in Aragón generate environmental benefits from carbon capture close to 116 M€. The abatement potential of measures if their interactions are considered is 10% less than the sum of the mitigation potential of each measure taken individually. In general, the interaction between the measures reduces the magnitude of reductions obtained with measure taken individually, so that the efficiency of cost decreases as successive additional measures are introduced. The efficient combination of measures, with or without considering interactions, includes the following measures: adjustment of crop nitrogen fertilization, substitution of mineral fertilization by organic fertilization, minimum tillage, rotation of crops with legumes, cover crops for arable plants, decrease in the protein content of pig diet, and forest management oriented towards carbon sequestration. The abatement potential of the best combination of measures increases for higher social cost of carbon, as additional measures become profitable and enter the combination. The results also indicate that GHG emissions are expected to reach 5,2 MtCO_{2e} in 2050 if no action is taken but can be reduced to 1,7 MtCO_{2e} if all measures are implemented. These findings are intended to support mitigation efforts in the region, and could serve as guide for the design and implementation of mitigation strategies.

Résumé

Le changement climatique représente une menace sérieuse pour la société humaine dans les futures décennies et constitue une externalité négative importante des activités économiques de la population mondiale. La pollution anthropique altère l'intégrité de la nature et peut entraîner des changements irréversibles. Le secteur agricole est l'un des secteurs qui génère importantes émissions de gaz à effet de serre (GES) à la suite de l'expansion de l'agriculture intensive en ressources naturelles, capital et d'autres intrants qui génère une augmentation des dommages environnementaux. Mais le secteur agricole offre également des opportunités à faible coût pour atténuer les émissions de GES et protéger l'environnement grâce à son potentiel d'atténuation et de fixation du carbone dans l'atmosphère. La pollution diffuse dans le secteur agricole est un problème complexe caractérisé par la difficulté d'identifier et de contrôler la localisation et le volume de la charge d'émission à la source et dans l'environnement. Cette contamination affecte les systèmes naturels et humains, détériore la qualité de l'eau et de l'air, modifie les habitats des espèces animales et végétales et provoque leur dégradation ou leur extinction. Afin de résoudre les problèmes de émissions GES, il est nécessaire de concevoir des politiques d'atténuation basées sur la

coopération de tous les acteurs et les groupes d'intérêt, car la durabilité environnementale ne peut être atteinte sans une action collective.

Ce document consiste à l'estimation de la balance des émissions de GES dans le secteur agricole en Aragón, l'analyse économique et environnementale des diverses mesures d'atténuation des émissions de GES, ainsi que la prise en compte de la perspective de l'évolution future de l'agriculture aragonaise dans différents scénarios de politique d'atténuation. L'analyse de l'effort d'atténuation examine les effets des mesures individuelles et l'ensemble des mesures en tenant compte de leurs interactions. L'outil d'analyse est basé sur l'estimation du rapport coût-efficacité des mesures, ce qui permet d'élaborer la courbe de coût marginal de réduction (MACC) des émissions.

Les résultats montrent que les émissions du secteur agricole en Aragón atteignent 4,1 MtCO₂e et sont concentrées dans les régions de Monegros (14%), Cinco Villas (11%), La Litera (9%), et Hoya de Huesca (6%). Les forêts aragonaises sont d'importants puits de carbone, avec une capture qui atteint 3 MtCO₂e, et qui sont concentrés dans Sobrarbe, Ribagorza, Jacetania, Guadar et cinco villas. La majeure partie du carbone est capturée par les forêts de pins et les chênes verts. Les espèces forestières d'Aragón génèrent des bénéfices environnementaux en capturant le carbone d'environ 116 millions d'euros. Le potentiel de réduction des mesures si leur interaction est prise en compte est inférieur de 10% à la somme du potentiel d'atténuation de chaque mesure prise individuellement. En général, l'interaction entre les mesures réduit l'ampleur de la réduction obtenue avec la mesure prise individuellement, ce qui diminue l'efficacité des coûts au titre des mesures supplémentaires successives introduites. La combinaison efficace de mesures dans les deux cas si en tenant compte l'interaction ou non comprend les mesures suivantes : ajustement de la fertilisation azotée, remplacer la fertilisation minérale pour organique, la rotation des cultures avec des légumineuses, cultures couvertes avec des herbacées, la réduction des protéines dans le régime alimentaire du porc, et le changement dans la gestion des forêts. Le potentiel de réduction de la meilleure combinaison des mesures augmente avec le coût social du carbone, et à mesure que des mesures supplémentaires entrent en jeu. Les résultats indiquent également que les émissions de GES peuvent atteindre 5,2 MtCO₂e en 2050 si les mesures ne sont pas prises, mais elles peuvent être réduites à 1,7 MtCO₂e si toutes les mesures sont prises. Les résultats visent à soutenir les efforts d'atténuation dans la région et servent de guide pour la conception et la mise en œuvre de stratégies d'atténuation.

Índice

Capítulo 1

INTRODUCCION

1.1. Importancia del trabajo.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Metodología.....	4

Capítulo 2

MARCO TEORICO DEL PROBLEMA DE CAMBIO CLIMATICO

2.1. El Cambio Climático.....	9
2.1.1. El calentamiento global.....	10
2.1.2. El efecto invernadero.....	14
2.1.3. Los gases de efecto invernadero.....	15
2.1.4. La influencia antropogénica.....	17
2.2. Impactos del cambio climático.....	18
2.3. Marco institucional y legislativo.....	20
2.3.1. La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.....	21
2.3.2. El Protocolo de Kioto.....	21
2.3.3. El Acuerdo de París de 2015	21
2.3.4. Cambio climático y políticas europeas.....	22
2.4. La agricultura y el cambio climático.....	24
2.4.1. Las fuentes de emisiones GEI de la agricultura.....	25
2.4.1.1. Las emisiones del óxido nitroso.....	26
2.4.1.2. Las emisiones de metano.....	29
2.4.1.3. Las emisiones de dióxido de carbono.....	32
2.4.2. Impacto del cambio climático sobre la agricultura.....	33
2.4.3. La contribución de la agricultura en la mitigación del cambio climático.....	36
2.5. Marco teórico para el control de las emisiones contaminantes.....	38

2.5.1. Los instrumentos de control de las emisiones GEI	41
2.5.1.1. Los instrumentos de mando y control	41
2.5.1.2. Los instrumentos económicos	42
2.5.1.3. Los instrumentos institucionales	43
2.5.2. El enfoque de cooperación entre los agentes contaminadores: teoría de juegos	43

Capítulo 3

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

3.1. La estimación del balance de emisiones de origen agrario	48
3.1.1. Metodología de estimación de las emisiones GEI	48
3.1.2. Caracterización de la zona de estudio	50
3.1.2.1. Los datos específicos de Aragón para el cálculo de las emisiones	54
3.2. La estimación del potencial de mitigación en Aragón	62
3.2.1. Metodología empleada para la estimación del potencial de reducción de medidas de mitigación	62
3.2.2. Descripción de las medidas seleccionadas	63
3.2.3. El enfoque de la curva del coste de reducción marginal (MACC)	74
3.3. Escenarios de políticas de mitigación de emisiones agrícolas en 2050	76

Capítulo 4

ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Inventario de las emisiones GEI en Aragón	81
4.2. El potencial de reducción de las medidas de mitigación	84
4.2.1. El potencial de mitigación de las medidas de forma individual	85
4.2.2. El potencial de mitigación de las medidas teniendo en cuenta la interacción entre medidas ..	96
4.3. Análisis de sensibilidad del beneficio social bajo diferentes niveles de coste social del carbono..	105
4.4. Escenarios de políticas de mitigación de emisiones agrícolas	107

Capítulo 5

CONCLUSIONES

<i>CONCLUSIONES</i>	113
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</i>	122
<i>ANEXO</i>	136

Índice de cuadros

Cuadro 2.1. Factores de emisión del N ₂ O según el sistema de manejo de estiércol.....	29
Cuadro 2.2. Factores de emisión del CH ₄ de la fermentación entérica (España).....	30
Cuadro 2.3. Factores de emisión del CH ₄ del manejo de estiércol	32
Cuadro 3.1. Cantidad de nitrógeno excretado por tipo de animal	50
Cuadro 3.2. Margen neto por tipo de animal (€/animal).....	56
Cuadro 3.3. Manejo de los cultivos en seco.....	57
Cuadro 3.4. Manejo de los cultivos en regadío.....	57
Cuadro 3.5. Fijación de carbono en Aragón (tCO ₂ e), 2017	60
Cuadro 3.6. Valor medioambiental por la fijación de carbono (€).....	61
Cuadro 3.7. La necesidad de nitrógeno por cada cultivo (kg/ha)	64
Cuadro 3.8. Resumen de las estimaciones de costes de implementar las prácticas de mitigación por tipo de cultivo en Aragón y sus efectos.....	72
Cuadro 4.1. Emisiones directas e indirectas del óxido nitroso(tCO ₂ e/ha/año)	82
Cuadro 4.2. El escenario base	84
Cuadro 4.3. Resultados de la medida “ajustar las cantidades de fertilizantes”	85
Cuadro 4.4. Resultados de la medida “La sustitución de la fertilización mineral por fertilización orgánica (estiércol)”	86
Cuadro 4.5. Resultados de la medida “La modernización del sistema de riego”	87
Cuadro 4.6. Resultados de la medida “Inhibidores de nitrificación”	88
Cuadro 4.7. Resultados de la medida “Reducción de laboreo”	88
Cuadro 4.8. Resultados de la medida “Rotación de cultivos con leguminosas”	89
Cuadro 4.9. Resultados de la medida “Cultivos cubierta en el maíz en regadío”	89
Cuadro 4.10. Resultados de la medida “Cultivos cubierta con los leñosos”	90
Cuadro 4.11. Resultados de la medida “Adición de lípidos en la dieta”	91
Cuadro 4.12. Resultados de la medida “Reducción de proteína en la dieta de porcino”	91
Cuadro 4.13. El análisis coste beneficio y la tasa de reducción de las medidas de mitigación de las emisiones GEI	94
Cuadro 4.14. Comparación entre el coste eficiencia y la tasa de reducción de las medidas analizadas independientemente y en combinación	97
Cuadro 4.15. Resultados de la medida “La sustitución de la fertilización mineral por fertilización orgánica (estiércol)”	98

Cuadro 4.16. Resultados de la medida “Reducción de laboreo”	99
Cuadro 4.17. Resultados de la medida “Cultivos cubierta en el maíz en regadío”	99
Cuadro 4.18. Resultados de la medida “Rotación de cultivos con leguminosas”	100
Cuadro 4.19. Resultados de la medida “Inhibidores de nitrificación”	100
Cuadro 4.20. Resultados de la medida” Modernización del sistema de riego”	101
Cuadro 4.21. El análisis coste beneficio y la tasa de reducción de las medidas de mitigación en interacción.....	103
Cuadro 4.22. Análisis de sensibilidad del beneficio social bajo diferentes costes de carbono	106

Índice de figuras

Figura 2.1. Emisiones antropogénicas anuales totales de GEI por gases, 1970-2010	10
Figura 2.2. El promedio global de la temperatura anual terrestre y oceánica	11
Figura 2.3. Temperatura media anual de España peninsular y Baleares (1965-2016)	12
Figura 2.4. Las proyecciones de la temperatura máxima anual en Aragón	13
Figura 2.5. Cambios en la precipitación media anual y estacional de la España peninsular	14
Figura 2.6. El proceso de efecto invernadero	15
Figura 2.7. Distribución anual de las emisiones de GEI por grupo de actividad para el año 2015 en España	16
Figura 2.8. Distribución anual de las emisiones de GEI por gas para el año 2015 en España.....	17
Figura 2.9. Evolución de las emisiones de GEI en Aragón (MtCO ₂ e).....	17
Figura 2.10. Evolución de las concentraciones de gases de efecto invernadero hasta el año 2005	18
Figura 2.11. Tendencia y proyección de la población mundial hasta el 2100.....	25
Figura 2.12. Principales emisiones de GEI en el sector agrícola	26
Figura 2.13. Consumo de fertilizantes nitrogenados inorgánicos en Aragón (tN)	27
Figura 2.14. Los procesos de nitrificación y desnitrificación en el suelo	28
Figura 2.15. Contribución de los procesos de nitrificación y desnitrificación a las emisiones de nitrógeno según la humedad del suelo.....	29
Figura 2.16. La fermentación entérica de los rumiantes	31
Figura 2.17. El cambio del uso de tierra es una fuente de las emisiones de CO ₂ en Australia	33
Figura 2.18. La agricultura inteligente reduce las emisiones GEI e incrementa el secuestro de carbón....	37
Figura 2.19. El coste marginal de la externalidad negativa.....	40
Figura 2.20. Funciones de daño y Beneficio marginal y total y el nivel eficiente de las emisiones.....	41
Figura 2.21. El daño marginal y el impuesto de contaminación	42
Figura 2.22. La reducción de contaminación bajo soluciones no cooperativas y cooperativas	44
Figura 3.1. Mapa de las comarcas de Aragón	53
Figura 3.2. .Distribución de la superficie de los cultivos estudiados.....	55
Figura 3.3. Los pasos claves de la elaboración del MACC	75
Figura 3.4. La curva de coste de reducción marginal (MACC)	76
Figura 4.1. Las emisiones GEI del sector agrario en Aragón	83
Figura 4.2. MACC de los distintos cultivos por la modernización del sistema de riego.....	87
Figura 4.3. MACC de las medidas de mitigación de las emisiones GEI	95
Figura 4.4. MACC de las medidas de mitigación con interacciones entre ellos.....	104

Figura 4.5. Las emisiones GEI en 2050 bajo los escenarios de políticas de mitigación.....	107
Figura 4.6. Las emisiones GEI en 2014 y en 2050.....	108
Figura 4.7. La proyección de emisiones GEI en los distintos escenarios.....	109



Capítulo 1

INTRODUCCION

Capítulo 1

INTRODUCCION

1.1. Importancia del trabajo

El medio ambiente es un sistema global complejo cuya evolución depende de las relaciones entre los procesos biofísicos y los procesos socioeconómicos. Las interacciones entre sus diferentes componentes muestran una progresiva degradación del medio ambiente por la presión creciente de las actividades económicas y el aumento de la población sobre los ecosistemas y los recursos naturales.

Como consecuencia de estas presiones se ha observado en los últimos decenios un cambio rápido del clima que no se corresponde con las fluctuaciones naturales. Este cambio climático es una externalidad negativa de las actividades económicas que está dañando el entorno natural, los ecosistemas y las actividades del sector primero, y que puede provocar en el futuro daños catastróficos en la naturaleza y en las sociedades humanas. Este fenómeno es un problema asociado al modelo actual de crecimiento de la población y de las actividades económicas basado en el uso de combustibles fósiles, el cambio en los usos de la tierra (urbanización, deforestación, desertización...), y la intensificación de la agricultura. Todas estas actividades antropogénicas han provocado un aumento masivo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que amenazan la estabilidad de los ecosistemas y el bienestar de las generaciones futuras. Estas emisiones GEI están modificando el sistema climático global, y las predicciones en el futuro son mayores temperaturas, menores precipitaciones en las regiones áridas y semiáridas, la elevación del nivel del mar, y una mayor frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos (IPCC, 2007a, 2014a). Estas amenazas requieren de la acción colectiva de las sociedades humanas para la mitigación y la adaptación al cambio climático.

Las actividades agrícolas son esenciales para la producción de alimentos y su importancia aumenta en un contexto de fuerte crecimiento de la población y la renta mundiales. Ahora bien, la agricultura intensiva genera impactos negativos sobre el medio ambiente y los ecosistemas. Uno de los impactos negativos son las emisiones de GEI de las actividades agrícolas y ganaderas que alcanzan cerca del 12 por cien del total de emisiones, y son la principal fuente de emisiones que no son de CO₂: metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Las emisiones netas de los bosques suponen un 7 por cien de las emisiones, como consecuencia de la deforestación (Smith et al., 2014). La estimación de las emisiones del sector primero bajo distintos escenarios indican que seguirán aumentando en las próximas décadas, aunque su intensidad dependerá de las políticas de mitigación.

En España, el sector agrario emite 36 MtCO₂e de gases de efecto invernadero como consecuencia de las actividades agrícolas y ganaderas. La ganadería emite 22 MtCO₂e de metano y óxido nitroso, y la mayoría son emisiones de metano como consecuencia de la fermentación entérica y del manejo de los

estiércoles. El otro componente de las emisiones GEI del sector agrario es el óxido nitroso de la fertilización de los cultivos, que alcanzan las 14 MtCO₂e por las emisiones directas de suelos y las emisiones indirectas de lixiviación y escorrentía de nitrógeno. Estas emisiones directas e indirectas provienen de la fertilización nitrogenada de fuentes minerales y orgánicas cercana a los 1,2 millones de tN (MAGRAMA, 2014, 2016). Estas emisiones GEI del sector agrario son fuentes de contaminación difusa que se caracterizan por la dificultad de identificar el origen de la contaminación, la carga contaminante en origen, los procesos de transporte y destino de los contaminantes, el daño medioambiental de la carga contaminante, y el coste del daño. Por estas razones la contaminación difusa es muy difícil de controlar y regular. Por el contrario, algunas actividades industriales y urbanas son fuentes de contaminación puntual que se puede identificar, localizar y medir, y su control es mucho más sencillo que la contaminación difusa, como por ejemplo mediante instrumentos económicos como los impuestos, las subvenciones o los mercados de emisiones.

Distintos estudios muestran que las actividades del sector agrario y forestal generan emisiones significativas de GEI a la atmosfera, pero también ofrecen oportunidades de bajo coste para reducir y mitigar las emisiones en comparación con otros sectores de la economía (Bajzelj et al., 2014; Gernaat et al., 2015; Reisinger et al., 2013). Estas alternativas de mitigación pueden llevarse a cabo mediante el control de las entradas de nitrógeno en el suelo, de metano a la atmósfera, y de la captura de carbono por los bosques. Se trata de opciones importantes en regiones que tienen una fuerte actividad agraria y forestal.

Una medida de interés en la agricultura es el secuestro de carbono orgánico en el suelo (SOC) que ya fue incluido en el protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. El secuestro de SOC tiene un gran potencial de mitigación de emisiones GEI, y de reducción de la concentración de CO₂ en la atmosfera a corto y medio plazo (Smith, 2012; IPCC, 2014c; Sánchez et al., 2016). Además, el manejo del suelo mejora la infiltración del agua, reduce la degradación del suelo, aumenta el carbono del suelo, y reduce las emisiones (Lal, 2013). También, optimiza la productividad de los cultivos (Ingram et al., 2014; Lal, 2004; Smith, 2012), la biodiversidad del suelo, reduce la erosión y la contaminación del agua, y puede ayudar a amortiguar el impacto del cambio climático en los sistemas de cultivos y pastos (Paustian, 2016).

La presión del sector primario sobre las emisiones GEI y sobre la escasez y calidad del agua obligan el diseñar políticas públicas de mitigación y adaptación al cambio climático. Para mejorar la toma de decisiones y el diseño de estas políticas en el sector primario es necesario un esfuerzo de investigación, que facilite las medidas a tomar en el sector agrario teniendo en cuenta la complejidad de los procesos biofísicos subyacentes, y la dificultad de implementar el control de la contaminación difusa. Los estudios deben examinar el impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente y los ecosistemas, y analizar las posibles soluciones para corregir la mala gestión de los recursos naturales y la degradación del

medio ambiental.

En los últimos años, se han desarrollado distintos estudios y trabajos que investigan la problemática de las emisiones GEI en la agricultura, y que suponen contribuciones significativas al conocimiento de los factores que controlan las emisiones de GEI a nivel de parcela y regional, y que plantean una amplia gama de medidas de mitigación (Kahil y Albiac, 2012, 2013; Plaza-Bonilla et al., 2014; Sánchez et al., 2016). La contribución de estos estudios es importante, pero ningún estudio proporciona información sobre el potencial de mitigación a nivel regional de los sectores agrario, ganadero y forestal. Esta información es necesaria para elaborar una estrategia de mitigación de las emisiones agrarias a nivel regional y nacional.

El propósito de este trabajo es estimar el balance de emisiones de GEI y de las emisiones de lixiviado de nitrógeno del sector agrario en Aragón, para analizar el potencial de las medidas de mitigación en la agricultura, la ganadería y la silvicultura. El potencial de las medidas se evalúa mediante el análisis de coste-eficiencia de las medidas, y la estimación del volumen de reducción de emisiones que proporciona cada medida. Este potencial se representa mediante la curva de coste marginal de reducción (o Marginal Abatement Cost Curve, MACC) lo que permite determinar la mejor combinación de medidas a seleccionar en las distintas zonas. También se elaboran diferentes escenarios de la agricultura de Aragón en el futuro, y sus efectos sobre el balance de emisiones GEI así como sobre los costes de mitigación bajo cada escenario.

1.2. Objetivos

El trabajo tiene como principales objetivos la descripción de las emisiones GEI del sector primario, y el análisis del potencial de las distintas medidas de mitigación en la agricultura, la ganadería y la silvicultura de Aragón. Esta información es fundamental para determinar la combinación de medidas eficientes, y para poder elaborar una estrategia general de mitigación a nivel regional.

Los objetivos específicos del trabajo son los siguientes:

- El primer objetivo es la estimación del balance de las emisiones de gases de efecto invernadero y de las emisiones de lixiviado de nitratos procedentes del sector agrario en Aragón. Esta información se agregará por comarcas, tipo de cultivos y cabaña ganadera.
- El segundo objetivo es llevar a cabo un análisis de coste-eficiencia de las distintas medidas de mitigación del cambio climático, así como estimar el volumen de reducción de emisiones que se consigue con las medidas seleccionadas, y representarlo mediante la curva MACC. Las diferentes medidas afectan a la gestión de los cultivos y del ganado, la gestión del suelo, y la gestión de los bosques para la captura de carbono.
- El tercer objetivo es estimar la reducción de emisiones cuando se combinan distintas medidas entre las que hay interacción, con el fin de determinar las mejores combinaciones.
- El cuarto objetivo es establecer escenarios de políticas de mitigación para la agricultura de Aragón

en el futuro, con el fin de examinar las perspectivas que tendrían las políticas de mitigación.

1.3. Metodología

La tarea que se plantea en este trabajo es el análisis económico y ambiental de las actividades de producción de los cultivos y la ganadería en Aragón, para poder estimar el balance de emisiones GEI, diseñar medidas de mitigación de las emisiones, y evaluar el coste-eficiencia de las medidas. El procedimiento ha consistido en la selección de los cultivos y especies ganaderas más importantes de la región, para a continuación sistematizar la información biofísica y económica de las actividades de producción agrícola y ganadera. Esta información incluye bases de datos desagregados a nivel municipal de las superficies de los cultivos, los censos ganaderos, los sistemas de riego, la fertilización, la carga de emisiones de óxido nitroso de los cultivos, la producción, costes y márgenes netos de los cultivos y la ganadería, la generación de estiércoles, y la carga de emisiones de metano y óxido nitroso de la ganadería. Posteriormente se seleccionan las distintas medidas de mitigación del cambio climático, y se calcula el potencial de reducción de emisiones y el coste de cada medida. Con esta información se realiza el análisis coste-eficiencia de las medidas y se elabora la curva de costes marginales de reducción (MACC). Finalmente se establece distintos escenarios para la agricultura de Aragón en el futuro, y se examina su impacto sobre las políticas de mitigación. La tesis se estructura en cinco capítulos. En este primer capítulo se presenta el problema de investigación, la importancia del trabajo, los objetivos y la descripción de la metodología empleada. En el segundo capítulo se define el marco teórico del problema del cambio climático y sus impactos sobre las actividades humanas y los ecosistemas naturales, con especial atención a la relación entre el cambio climático y el sector primario. En el capítulo se exponen los instrumentos de control de la contaminación difusa y de las emisiones GEI.

El tercer capítulo muestra la aplicación de la metodología al sector primario en Aragón. En primer lugar, se describen las fuentes de datos y las principales características de la zona de estudio para poder estimar las emisiones directas e indirectas de los cultivos, las emisiones del manejo del estiércol y las emisiones de la fermentación entérica. En segundo lugar, se describe la metodología y se evalúa el potencial de mitigación de emisiones. Se evalúa el potencial de cada una de las medidas si se aplicaran de forma individual, y el potencial de la combinación de medidas ya que entre ellas hay interacción. Ello permite obtener los costes, los ingresos y la efectividad de las medidas a nivel local y regional. También se calcula el coste-eficiencia de cada medida (en € por tCO₂e) y se clasifican las medidas en función de su coste-eficiencia utilizando la curva de coste marginal de reducción de emisiones (MACC). Al final del tercer capítulo, se presentan los distintos escenarios planteados para el futuro de la agricultura en Aragón y los impactos de estos escenarios.

En el cuarto capítulo se exponen los resultados del análisis coste-eficiencia de las diferentes medidas y la consiguiente curva de coste marginal de reducción de emisiones (MACC). También se analizan los efectos de las distintas medidas sobre el bienestar social, la renta de los agricultores, el uso de los inputs agua y nitrógeno, la carga de emisiones, el daño medioambiental, y la superficie cultivada. Esta información se utiliza para comparar los resultados de las medidas, tanto en la situación actual como bajo escenarios futuros del sector agrario en Aragón.

El capítulo cinco presenta las conclusiones del trabajo y las recomendaciones de políticas de mitigación, y se plantean líneas futuras de investigación para complementar el trabajo y mejorar los resultados.



Capítulo 2

MARCO TEORICO DEL PROBLEMA DE CAMBIO CLIMATICO

Capítulo 2

MARCO TEORICO DEL PROBLEMA DE CAMBIO CLIMATICO

2.1. El Cambio Climático

El clima es el principal factor que condiciona el crecimiento y desarrollo de los seres vivos del planeta. Las especies de flora y fauna que componen los ecosistemas necesitan un clima más o menos favorable, y su supervivencia está relacionada con las variaciones de los factores climáticos (temperatura, precipitación, viento...). El cambio climático ya se ha iniciado de manera intensa y rápida con un aumento de temperatura y de frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, subida del nivel del mar y problemas en la capa de ozono. Este cambio climático se presenta como una externalidad negativa de las actividades económicas que provoca daño en el entorno natural y sus ecosistemas, amenazas para las especies animales y vegetales, efectos negativos en los océanos, y mayor escasez de agua en las zonas áridas y semiáridas. Estos fenómenos son consecuencia del modelo de crecimiento actual de la población y de la renta basada en el uso de combustibles fósiles, el cambio del uso de tierra (urbanización, deforestación y desertización...) y la intensificación de la agricultura. Todas estas actividades antropogénicas han provocado un aumento masivo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el calentamiento global del planeta.

Según la Convención Marco sobre Cambio Climático (CMCC) y el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), el cambio climático se define como “un cambio de clima derivado de la variabilidad natural y de la actividad humana que altera la composición de la atmosfera”.

Según el quinto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2014c), las emisiones antropogénicas totales de GEI han seguido aumentando entre 1970 y 2010, con mayores incrementos al final de este período. La media del crecimiento de las emisiones anuales de GEI ha sido 1.0 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (GtCO₂e) (2,2%) entre 2000 y 2010, en comparación con 0,4 GtCO₂e (1,3%) entre 1970 y 2000 (Figura 2.1).

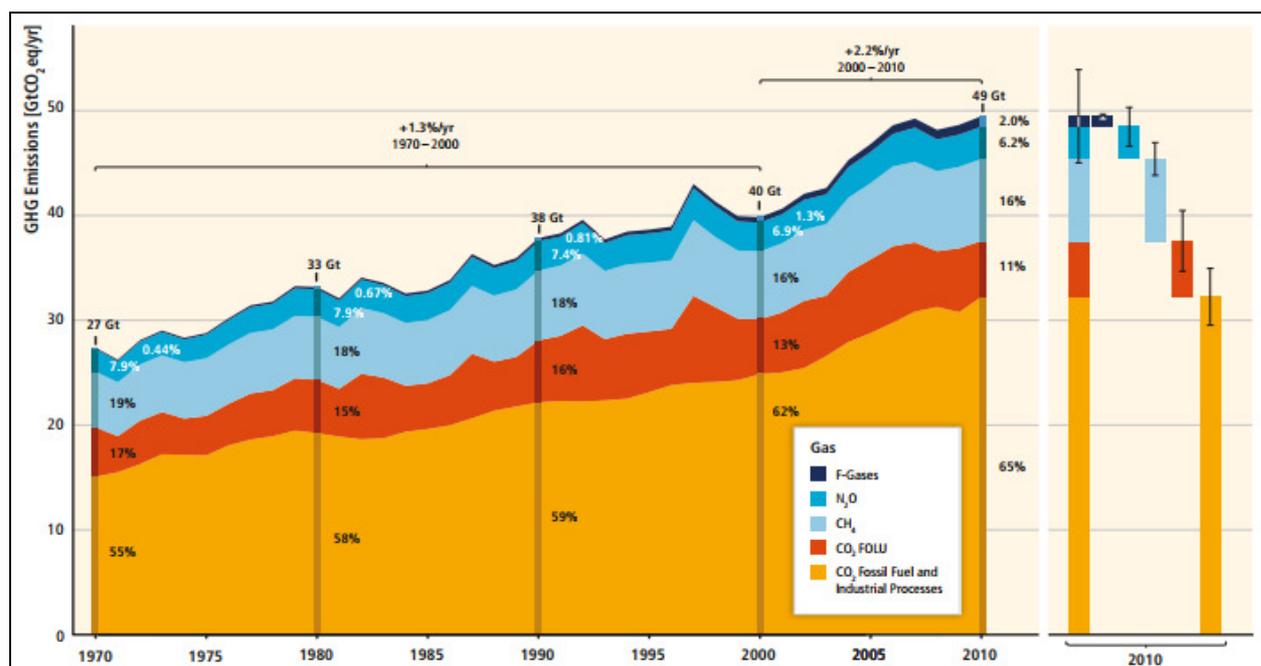


Figura 2.1. Emisiones antropogénicas anuales totales de GEI por gases, 1970-2010.

Fuente: IPCC (2014b).

El cambio climático se considera una grave amenaza para el desarrollo sostenible de la sociedad, para el medio ambiente y para los servicios que proveen los ecosistemas. Los impactos sobre la economía y el bienestar de las sociedades serán graves, en especial para las generaciones futuras. Es un problema común a todas las sociedades humanas y su resolución implica la necesidad de cooperación a todos los niveles mediante políticas locales, nacionales y regionales.

2.1.1. El calentamiento global

El cambio climático supone un cambio significativo en la interrelación entre la tierra, el océano y la atmósfera, lo que provoca un cambio en la circulación global de la atmósfera y del agua. Estos cambios de la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas definen el fenómeno del calentamiento global.

La figura 2.2 presenta la tendencia de calentamiento anual terrestre y oceánico hasta el año 2017. Se observa que las temperaturas anuales globales experimentan un incremento significativo, en especial durante los últimos años (304% entre 1992 y 2017), como consecuencia del aumento de emisiones GEI a la atmósfera. La anomalía de la temperatura alcanza 0,9 °C en 2017 (NASA-GISS, 2018).

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, 2018) indica que los cinco años más cálidos registrados han tenido lugar después de 2010, y señala que el año 2017 ha sido el tercer año más cálido de la serie.

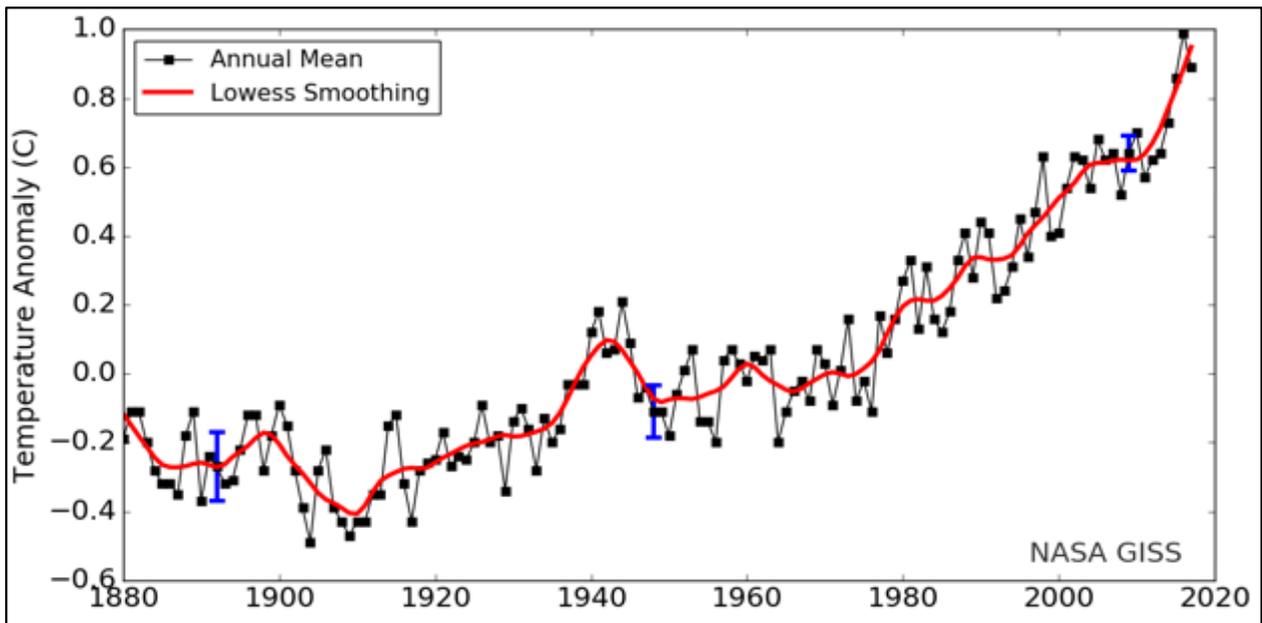


Figura 2.2. El promedio global de la temperatura anual terrestre y oceánica¹.

Fuente: NASA-GISS (2018).

Smith (2005) señala que la realidad del sistema climático es dependiente de la variabilidad climática natural. Es posible tener diferentes periodos de "enfriamiento" superpuesto a la tendencia de calentamiento a más largo plazo debido al forzamiento antropogénico de gases de efecto invernadero.

Según Benavides y León (2007), el calentamiento global se define como un incremento gradual de la temperatura del planeta que es una consecuencia del aumento de los gases de efecto invernadero. Estos GEI impiden que los rayos del sol salgan de la tierra, ya que los GEI retienen más los rayos infrarrojos que son responsables del aumento de la temperatura del planeta.

Según el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2014c), el sistema climático se está calentando inequívocamente, con un aumento de temperatura de 0,85 °C (0.65-1.06) en el período de 1880-2012. La evidencia científica sobre el cambio climático muestra que la mayor parte del calentamiento del planeta en los 100 últimos años es atribuible a la actividad humana.

La figura 2.3 presenta la tendencia de la temperatura media anual de España peninsular y Baleares entre 1965 y 2016, y se observa que hay una tendencia creciente significativa en todas las regiones españolas.

¹ La línea negra continua es la media anual global y la línea roja continua es la bajada de cinco años sin problemas. Las barras de incertidumbre azules (límite de confianza del 95%) solo tienen en cuenta el muestreo espacial incompleto.

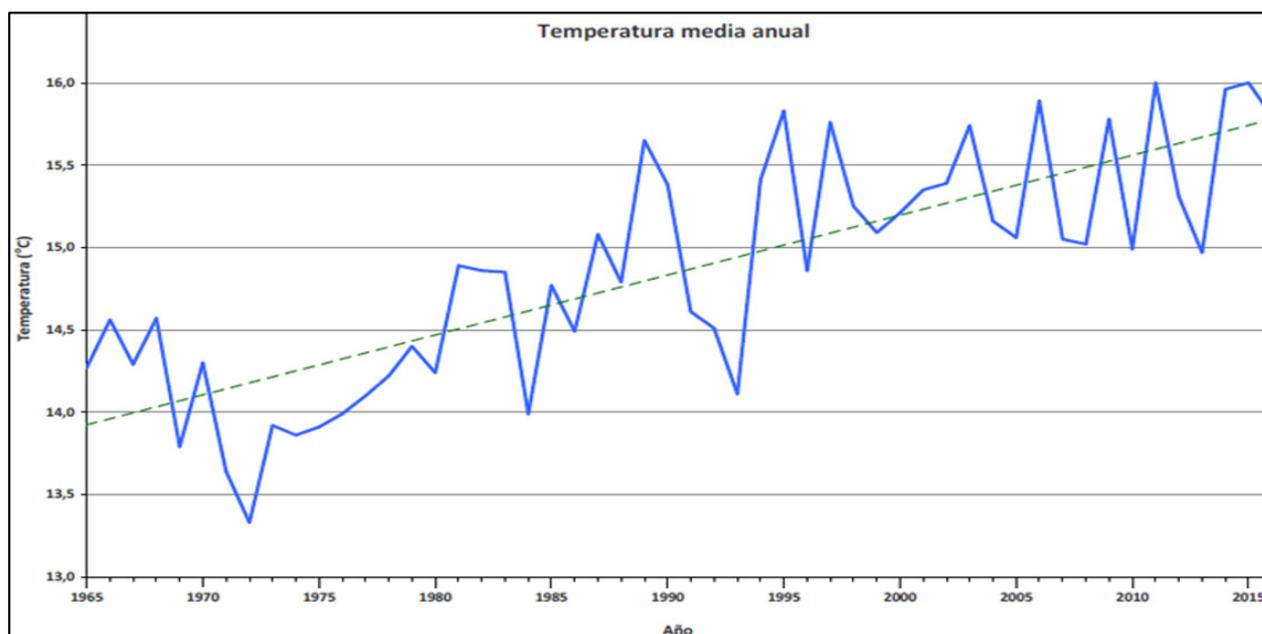


Figura 2.3. Temperatura media anual de España peninsular y Baleares (1965-2016)².

Fuente: AEMET (2017).

Las proyecciones de temperatura máxima bajo el escenario de emisión SRES A1B ya indicaban un patrón de calentamiento a gran escala sobre Europa que se intensifica en el transcurso del siglo XXI (IPCC, 2007c).

Para España peninsular, se observa un aumento progresivo de la temperatura máxima anual tanto en valores medios como en su incertidumbre a lo largo del siglo XXI. Estos incrementos estarían entre 4.2 °C y 6.4 °C bajo el escenario más emisoro RCP 8.5; entre 3.0 °C y 4.0 °C bajo el escenario RCP 6.0, y entre 2.0 °C y 3.4 °C bajo el escenario RCP 4.5³. Se observa un aumento progresivo de la temperatura máxima a escala estacional, a pesar de que los aumentos durante las estaciones estival y otoñal sean mayores que durante el invierno y la primavera. Las proyecciones bajo el escenario con más emisiones se sitúan entre 5.4 y 8.4 °C en verano, entre 4.6 y 7.2 °C en otoño, entre 3.2 y 5.0 °C en invierno, y entre 3.4 y 5.6 °C en primavera (IPCC-AR5, 2017).

Las proyecciones climáticas de la Agencia Estatal de Meteorología hasta 2100 regionalizadas para Aragón bajo los escenarios de emisión RCP 4.5, RCP 6, RCP 8.5 muestran que la temperatura máxima anual aumenta progresivamente bajo todos los escenarios, con un aumento muy significativo a finales del siglo, especialmente bajo el escenario RCP 8.5 donde aumenta 6°C (Figura 2.4).

² El azul representa la temperatura media anual y el verde la tendencia lineal.

³ En el quinto informe del IPCC se han definido 4 nuevos escenarios de emisión, que se determinan Trayectorias de Concentración Representativas (RCP). Éstas se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5 W/m². Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2.6), 2 escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8.5).

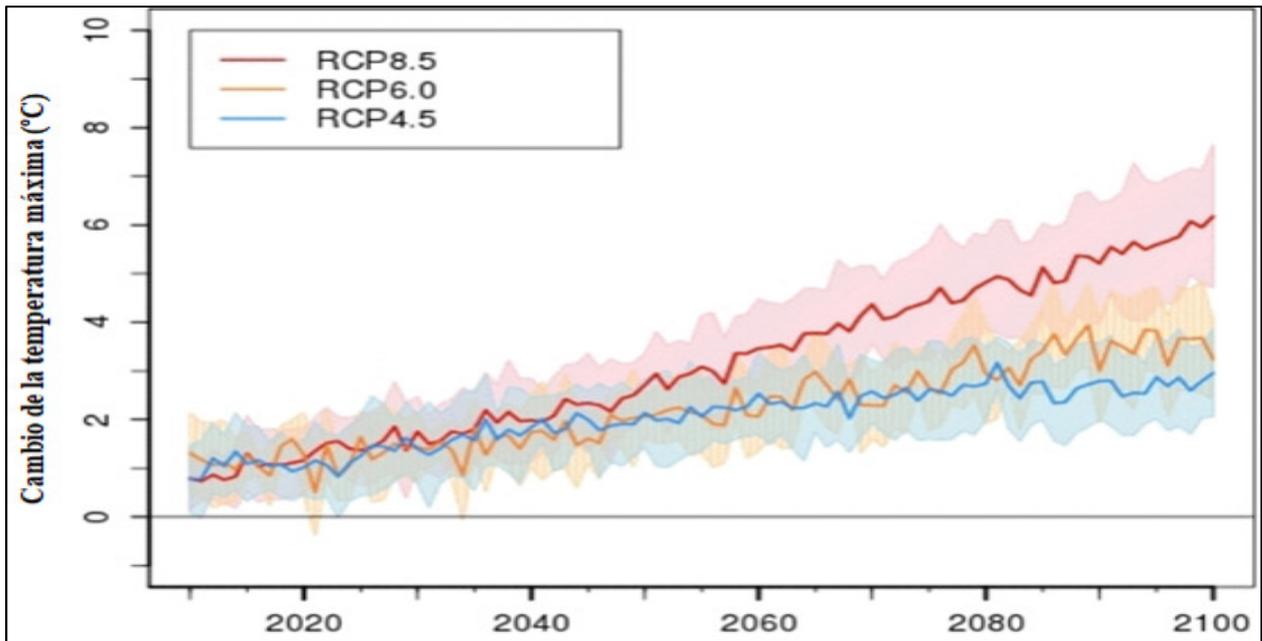


Figura 2.4. Las proyecciones de la temperatura máxima anual en Aragón.

Fuente: AEMET (2018).

Según el quinto informe del IPCC, desde mediados del siglo XIX se observa que el ritmo de la elevación del nivel del mar ha sido superior a la media de los dos milenios anteriores. Además, el nivel medio global del mar se elevó 0,19 metros durante el período 1901-2010.

Por lo que respecta a las precipitaciones, se detecta una ausencia de la concordancia en el cambio entre las diferentes proyecciones como en la magnitud de precipitación entre las diferentes regiones de España. Pero en general bajo el escenario con mayores emisiones, se observa una reducción significativa de las precipitaciones anuales tanto en primavera como en otoño. En la estación invernal, se aprecia mayores descensos en gran parte del levante español y en la cornisa cantábrica para el final del siglo (Figura 2.5).

Las precipitaciones primaverales descienden más que las invernales, con un descenso más acusado en el archipiélago canario, y algo menor en Andalucía, Murcia, Galicia, y en las cuencas del sur peninsular. En verano, la disminución es acusada en el noreste y en las Islas de Canarias. En otoño, la disminución en el sur y las Islas de Canarias. (IPCC-AR5, 2017).

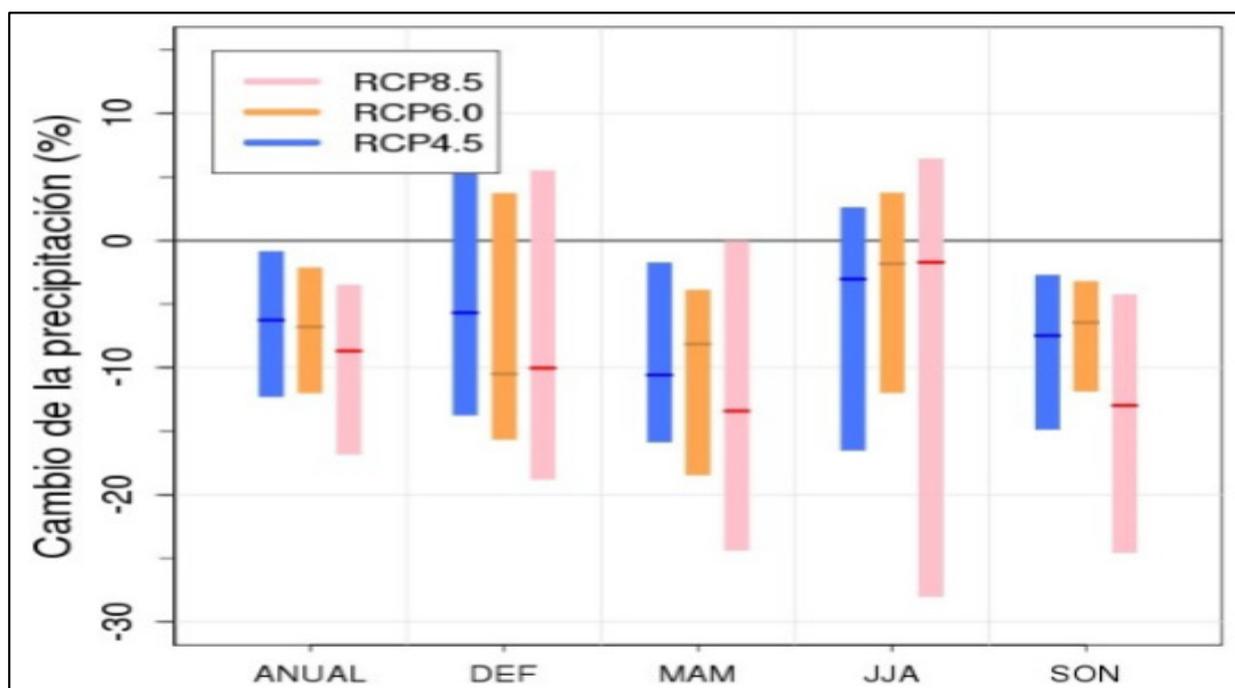


Figura 2.5. Cambios en la precipitación media anual y estacional de la España peninsular⁴.

Fuente: IPCC (2017).

El calentamiento global afectará a la disponibilidad de recursos hídricos mientras que aumentará la demanda de agua y alimentos por el crecimiento de la población y la renta mundiales. Las proyecciones futuras muestran que la población con disponibilidad del agua muy reducida aumentará en un 15 % a escala global (Schewe et al., 2014).

2.1.2. El efecto invernadero

El efecto invernadero es un proceso natural de aumento de la temperatura por la mayor concentración de gases en la atmósfera que atrapan la energía solar. Estos gases de efecto invernadero impiden la salida de la radiación calorífica reflejada (Figura 2.6). En ausencia del efecto invernadero natural, la temperatura media de la tierra sería de -18°C en lugar de los $+15^{\circ}\text{C}$ actuales. La actividad humana emite a la atmósfera gases como el dióxido de carbono, el óxido nitroso y el metano que absorben la radiación infrarroja. Esta mayor captación de radiación infrarroja vuelve a ser emitida a la tierra. Por tanto, el aumento de la concentración de estos gases intensifica el efecto invernadero natural y calienta el planeta, amenazando la salud de los ecosistemas y las actividades humanas (IPCC, 2007b).

⁴ Esta figura del IPCC, 2017 es obtenida a partir de todas las proyecciones generadas bajo los tres escenarios de emisiones (RCP 4.5, RCP 6, RCP 8.5) y para los últimos veinte años del siglo XXI (2081-2100). La línea central indica la mediana de las proyecciones y la barra el rango entre los percentiles 17 y 83.

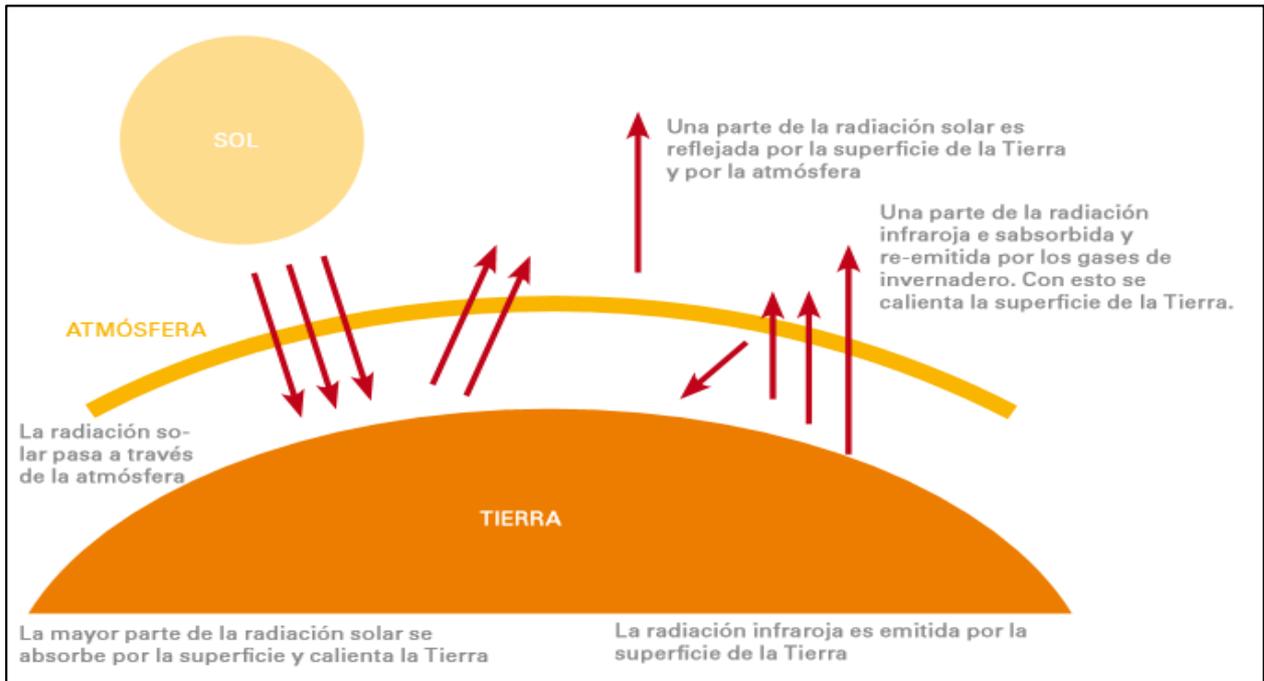


Figura 2.6. El proceso de efecto invernadero.

Fuente: BRUMAS (2010).

2.1.3. Los gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero son componentes gaseosos de la atmósfera tanto de origen natural como antropógeno, que absorben y emiten radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Hay dos tipos de gases de efecto invernadero, GEI directos que son los gases emitidos a la atmósfera que contribuyen al efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O y los componentes halogenados), y otros indirectos que son los precursores de la capa de ozono troposférico que se transforman en gases de efecto invernadero directo en la atmósfera (los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono...).

Los principales gases de efecto invernadero producidos por el hombre son el dióxido de carbono, el metano y el óxido nítrico, cuya concentración ha aumentado desde la era preindustrial. En España, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el año 2015 alcanzan los 336 millones tCO_2e con un incremento del 15% en comparación con el año 1990 (MAPAMA, 2017a).

España tiene el perfil emisor típico de un país industrializado, donde predominan las emisiones procedentes del uso de la energía (77%) en 2015, dentro de este grupo, la generación de electricidad supuso un 22% del total de las emisiones, mientras que el transporte generó un 25% del total de las emisiones. Las emisiones del sector agrícola representan un 10%, el sector industrial un 9%, y las actividades de gestión de residuos un 4% del total de las emisiones (MAPAMA, 2017a), (Figura 2.7).

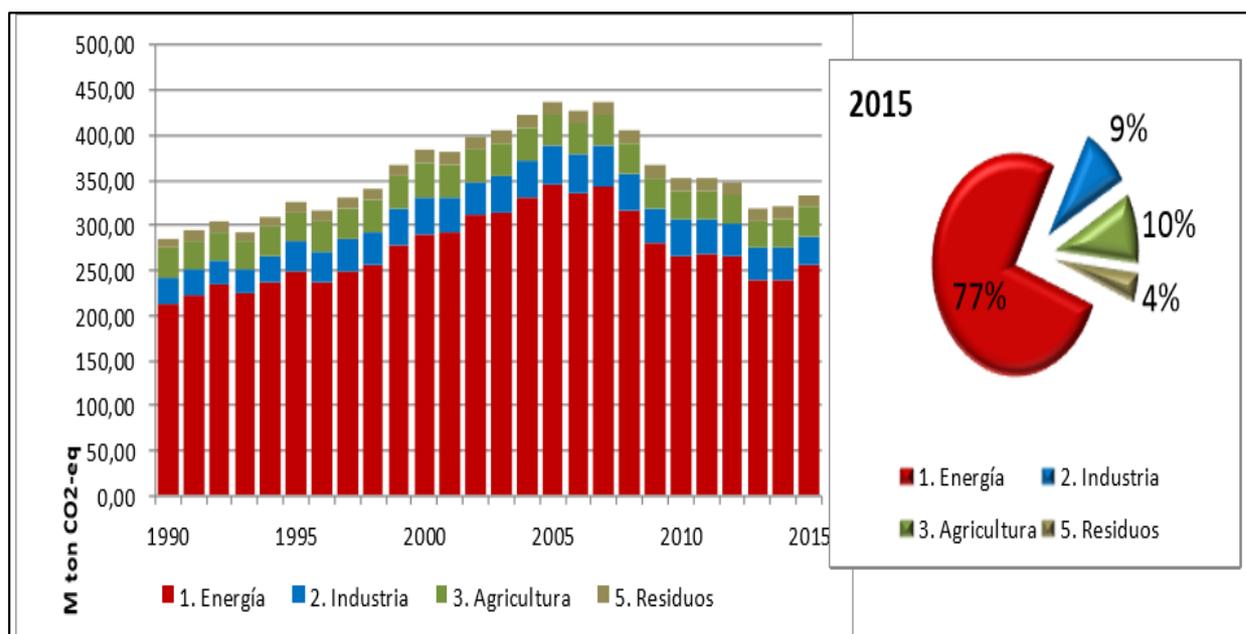


Figura 2.7. Distribución anual de las emisiones de GEI por grupo de actividad para el año 2015 en España. Fuente: MAPAMA (2017a).

El dióxido de carbono es uno de los gases más importantes en el sistema atmósfera-océano-tierra y es el principal gas emitido y asociado a las actividades humanas. En España el CO₂ representa el 81% de las emisiones, junto a las emisiones de CH₄ (11%) y de N₂O (5%) (MAPAMA, 2017a), (Figura 2.8).

La evolución de las emisiones GEI en España aumentaron un 53% en 2007 respecto a 1990, y posteriormente disminuyeron hasta el 2013 debido a la crisis económica y el uso de energía renovable en el sector eléctrico. La tendencia cambia a partir de 2013 y alcanza un volumen de emisiones de 339 MtCO₂e en 2015 lo que supone un aumento del 3,2% respecto a 2014. Este aumento se explica por la mayor generación de electricidad en las centrales de carbón. La proyección de las emisiones GEI en España para el periodo 2015-2050 muestra una estabilización hasta 2030, seguido de un aumento de 10% para el año 2050 (MAPAMA, 2017b).

La figura 2.9 muestra la evolución de las emisiones GEI en Aragón para el periodo 1990-2015. Hubo un aumento cercano al 50% entre 1990 y 2007, pero con la crisis económica las emisiones han caído hasta el nivel 1990.

En Aragón, el sector agrario emite 3,5 MtCO₂e de gases de efecto invernadero en 2015 como consecuencia de las actividades agrícolas y ganaderas, lo que representan el 21% de las emisiones totales de la región, mientras que, solo representan el 11% en el conjunto España (IAEST, 2017a).

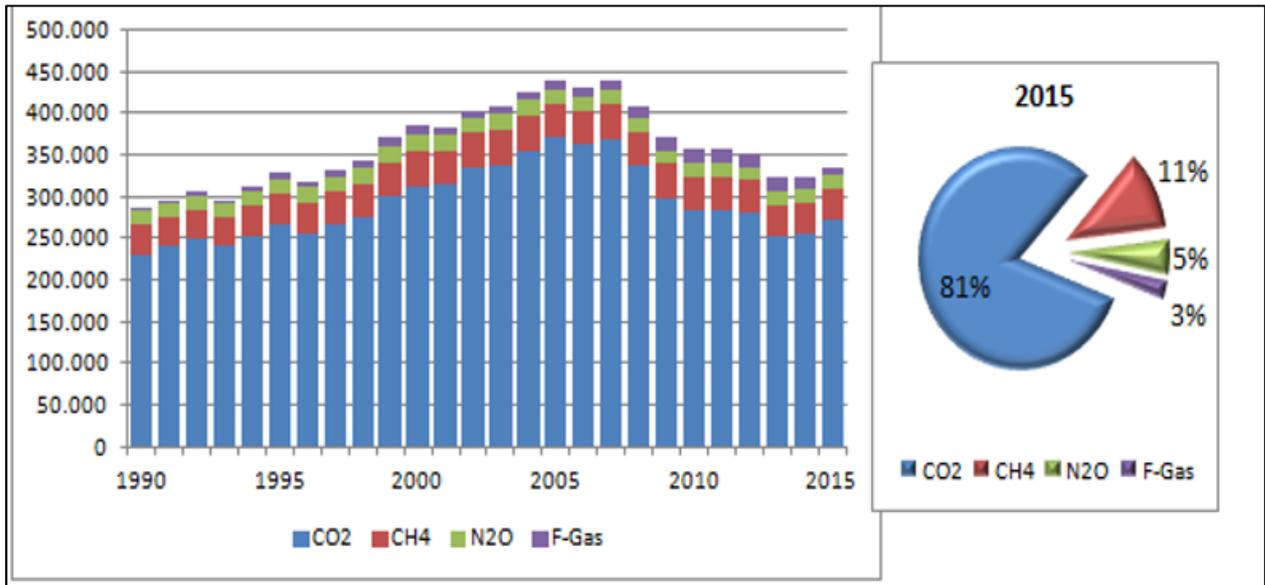


Figura 2.8. Distribución anual de las emisiones de GEI por gas para el año 2015 en España.

Fuente: MAPAMA (2017a).

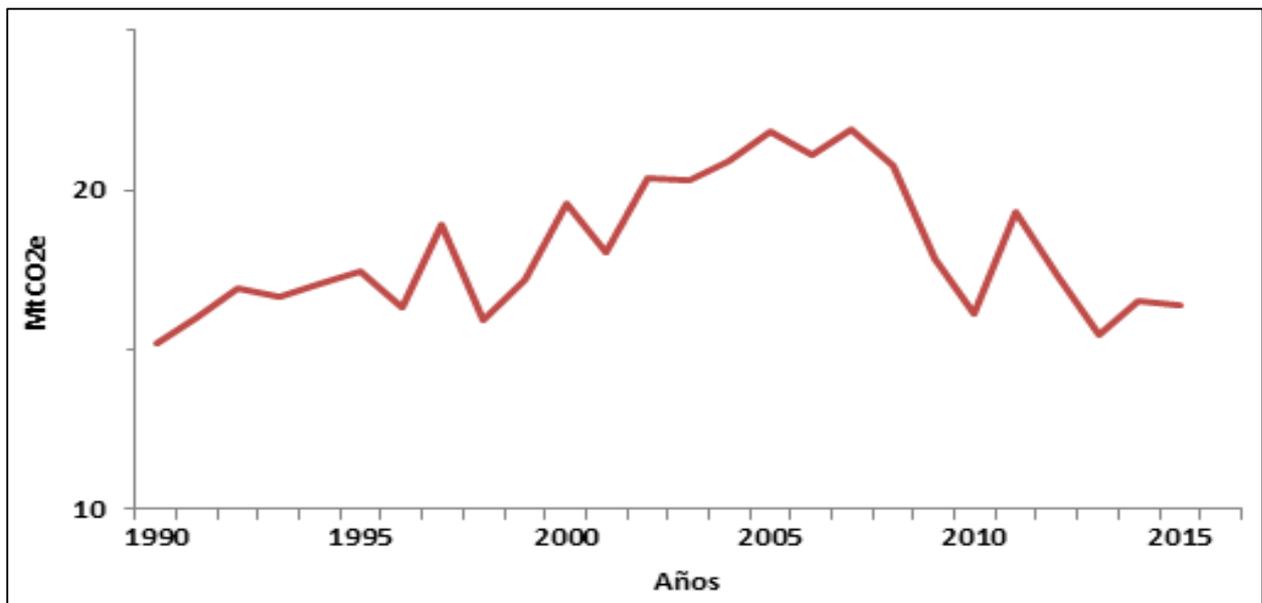


Figura 2.9. Evolución de las emisiones de GEI en Aragón (MtCO₂e).

Fuente: MAPAMA (2017c).

2.1.4. La influencia antropogénica

El cambio climático es una externalidad negativa de la actividad humana, estas actividades antropogénicas provocan cambios en la atmósfera terrestre y un aumento masivo de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Este fenómeno es asociado al modelo de crecimiento actual de la población y de la renta basado en el uso de combustibles fósiles, el cambio en los usos de la tierra (urbanización, deforestación, desertización...), y la intensificación de la agricultura. Estos gases de efecto invernadero afectan al clima al alterar la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente. La variación de la propiedad de estos gases en la atmosfera provoca el calentamiento global.

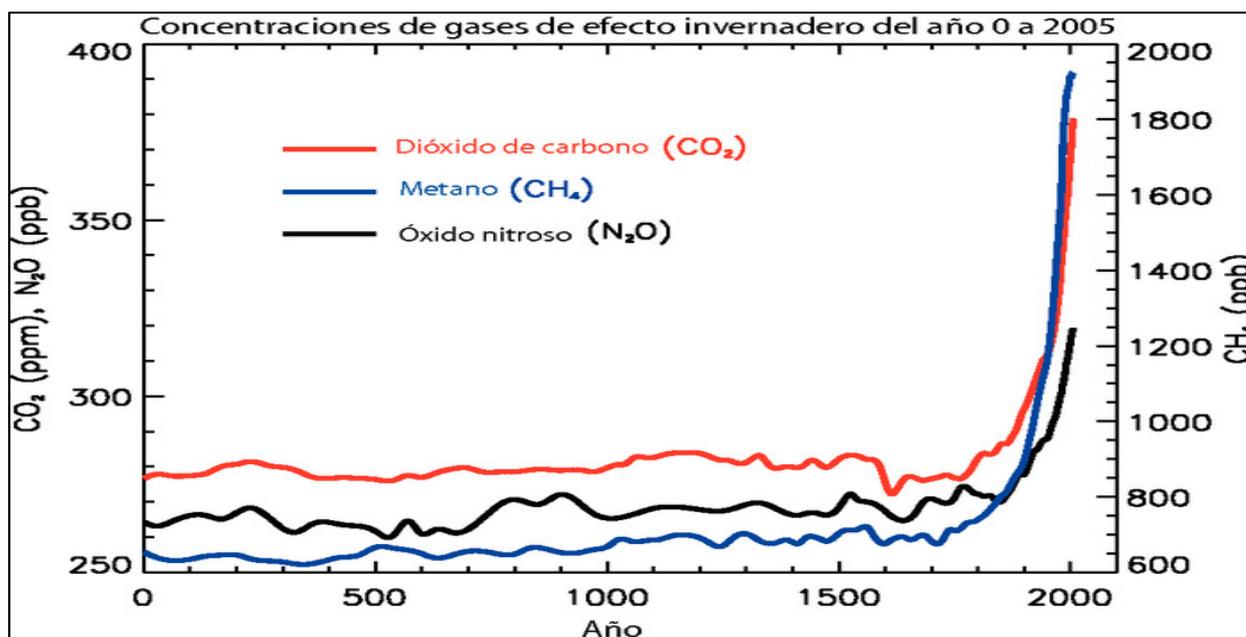


Figura 2.10. Evolución de las concentraciones de gases de efecto invernadero hasta el año 2005⁵.

Fuente: IPCC (2007c).

A lo largo de la historia los fenómenos de cambio climático no han sido una rareza, pero se habían producido por causas naturales, sin la influencia del hombre. Desde la revolución industrial, la situación ha cambiado y la acción humana está influyendo y acelerando el proceso de cambio climático global como se puede ver en la figura 2.10 por el incremento masivo de emisiones de las actividades humanas. Por tanto, el impacto de los seres humanos en el clima tras la industrialización es muy superior a los cambios de los procesos naturales, tales como efectos solares y erupciones volcánicas. (IPCC, 2007c).

2.2. Impactos del cambio climático

El calentamiento global y la influencia antropogénica en el sistema climático plantean riesgos e impactos significativos sobre los sistemas humanos y naturales. Según el quinto informe del IPCC, la mayoría de los impactos del cambio climático son provocados por el calentamiento global y/o los cambios en los patrones de precipitación y la acidificación del océano. Estos impactos son más evidentes en los sistemas naturales incluyendo los ecosistemas terrestres y marinos, los recursos hídricos, la criosfera y los sistemas costeros.

La variabilidad climática afectará a la disponibilidad y la calidad del agua, a los ecosistemas biológicos, muchas especies terrestres, de agua dulce y marinas han modificado sus áreas de distribución geográfica y sus actividades estacionales con un mayor riesgo de extinción. En Europa, se ha observado un

⁵ Las unidades de concentración se miden en partes por millón (ppm) o partes por miles de millón (ppb), indicando la cantidad de moléculas de gases de efecto invernadero por millón o miles de millón de moléculas de aire, respectivamente, en una muestra de la atmósfera.

calentamiento general que afecta a todas las estaciones del año, con una mayor frecuencia de fenómenos extremos, especialmente en el sur de Europa donde aumentan los incendios forestales. Por otra parte, el cambio climático amenaza a la estabilidad de los pequeños agricultores y pescadores de subsistencia, amenazando la seguridad alimentaria, favoreciendo las enfermedades diarreicas, cardiorrespiratorias e infecciosas, la morbilidad y mortalidad por las olas de calor, las inundaciones y las sequías, así como la aparición de nuevos vectores de enfermedades (IPCC, 2007d, 2014b).

Impactos en los sistemas naturales

El MAPAMA (2014a) señala que en todos los continentes se observan variaciones en el ciclo hidrológico, que afectan a la disponibilidad del agua y su calidad y al cambio de caudales en los ríos. En Europa, en el periodo 1962-2004, los caudales han disminuido en el sur y en el este, y se han incrementado en el norte. En las regiones con nevadas estacionales, los ríos han incrementado sus caudales de invierno, por el aumento de precipitaciones mientras disminuyen en primavera por el calentamiento y el deshielo. En el hemisferio norte, la superficie cubierta por la nieve en primavera ha disminuido un 8% desde 1922. La variabilidad térmica del agua favorece la eutrofización y la disminución del oxígeno disuelto, junto a un mayor contenido de nutrientes que deteriora la calidad del agua. La fusión del hielo de los glaciares está ocasionando la disminución de la masa glaciar y la expansión o aparición de nuevos lagos en los Alpes, Himalaya y otras regiones de montaña con roturas y vaciamiento súbito que generan inundaciones y daños importantes aguas abajo.

Los ecosistemas terrestres y acuáticos de tipo mediterráneo se encuentran entre los más vulnerables al cambio climático y tienen los mayores riesgos de incendio. Asimismo, se observa cambios fenológicos significativos en muchas especies de fauna y de flora con una reducción de sus áreas de distribución, y el empeoramiento de la salud y ritmo de crecimiento de las especies arbóreas dominantes y del riesgo de erosión y desertificación. En Europa, América del Norte, Chile y otras áreas se ha observado un desplazamiento geográfico de las especies de unos 17 kilómetros en promedio y por década, hacia los polos y ascensos en altitud de 11 m (IPCC, 2014a).

El IPCC (2014a) señala que la temperatura de la superficie del mar ha aumentado significativamente durante los últimos 30 años, con amplias variaciones espaciales y estacionales. El calentamiento del océano ha provocado cambios en los límites de distribución de los hábitats costeros. En la costa norte de España, se observa una disminución de las poblaciones de algas debido al calentamiento del océano. Además, el cambio climático está cambiando de manera significativa en las últimas décadas las propiedades físicas, químicas y biológicas de los océanos que afectan a la fisiología de los seres vivos. Desde 1970, la temperatura de los océanos ha aumentado en torno a 0,1°C por década en la capa superficial de los 75 m superiores. En el Mediterráneo, este calentamiento ha provocado mortalidades masivas, así como con invasiones y propagaciones de nuevas especies de aguas cálidas, lo que provoca

una “tropicalización” de la fauna. También los flujos de CO₂ de la atmosfera al océano están reduciendo el pH medio del agua del mar de 0,1 unidades en el siglo pasado.

Impactos en los sistemas humanos

El cambio climático tiene impactos significativos sobre los sistemas humanos provocando cambios sociales y económicos. Según el quinto informe del IPCC, las tendencias de las diferentes variables climáticas y las concentraciones elevadas del ozono troposférico presentan impactos negativos sobre el sistema de producción de alimentos y la evolución de los rendimientos de diversos cultivos. Asimismo, se ha documentado una gran sensibilidad negativa de los rendimientos a las temperaturas diurnas extremas (alrededor de 30 °C). Estos impactos negativos observados sobre la productividad agraria afectan la base económica de los pequeños agricultores, los pescadores de subsistencia y el medio rural, que son las zonas más vulnerables debido a la mayor dependencia de la agricultura y de los recursos naturales.

Además, la variabilidad climática tiene impactos negativos directos e indirectos sobre la salud humana. Directamente con una mayor morbilidad y mortalidad debido a las olas de calor y las inundaciones y otros fenómenos extremos, por ejemplo, la ola de calor del 2003 en Europa registró una elevada mortalidad (15.000 muertos solo en Francia). La OECC (2007) señala que, en España, el cambio climático aumentara la mortalidad y la morbilidad e afectara sobre todo la población mayor de 65 años. Indirectamente a través las enfermedades transmitidas por los insectos, por el agua y por el aire, o a través el calor que afecta a la capacidad de trabajo. Estos factores son una amenaza para las sociedades humanas (seguridad alimentaria, capacidad laboral, desplazamiento de la población, efectos sobre los sistemas de atención de salud). A escala mundial, más de la mitad de los trabajos se desarrollan al aire libre, sobre todo en agricultura y construcción, lo que implica riesgo para la salud debido a la exposición a condiciones más cálidas y extremas (IPCC, 2014a).

La probabilidad de impactos severos y los riesgos futuros asociados al calentamiento global son elevados y pueden tener efectos irreversibles si no se toman medidas apropiadas de mitigación y adaptación.

2.3. Marco institucional y legislativo

Los trabajos de investigación sobre el cambio climático se iniciaron por el IPCC en el año 1988 para proporcionar a los gobiernos y a los responsables políticos con información fiable. El resultado fue la creación de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático en 1992 (UNFCCC), que elaboró el protocolo de Kioto en 1997. La última iniciativa Política es el Acuerdo de Paris del 2015 cuyo objetivo es que el calentamiento global no rebase los 1.5°C para reducir los riesgos y el impacto del cambio climático.

2.3.1. La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático es un instrumento de respuesta internacional que fue firmada por 160 países en la Cumbre de Tierra. Esta convención entró en vigor en 1994 y establece un marco normativo e institucional de acción de los países frente al cambio climático. La convención pretendía estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera para prevenir las interferencias peligrosas de carácter antropogénico. La convención muestra la importancia de promover el desarrollo sostenible, proponiendo políticas de mitigación en los países desarrollados y retrasando estas medidas en los países más pobres. Los países industrializados deberían reducir sus emisiones y cooperar con medios financieros y tecnológicos de apoyo a los países en desarrollo.

2.3.2. El Protocolo de Kioto

Los gobiernos de la Convención Marco adoptaron en 1997 el Protocolo de Kioto que es un instrumento jurídico destinado a reducir los gases de efecto invernadero. La entrada en vigor del protocolo necesitaba la ratificación de 55 países que acumularan el 55% de las emisiones mundiales. Los Estados Unidos que era el país con mayores emisiones GEI, rechazó el protocolo. El acuerdo entró en vigor en 2005, tras la entrada de Rusia, aunque posteriormente Rusia, Japón, Canadá y Nueva Zelanda han abandonado el protocolo. Por lo tanto, el efecto del protocolo sobre la reducción de emisiones globales ha sido marginal. El protocolo fija obligaciones de reducción, y es el único acuerdo con mecanismos de cumplimiento para la reducción de las emisiones GEI.

En el primer periodo de compromiso (2012), la Unión Europea se comprometió a reducir las emisiones un 8% respecto al año de base, pero con distintos compromisos para cada estado miembro. En el caso de España, las emisiones de GEI no podían superar en el primer periodo, lo que se ha cumplido por la caída de emisiones consecuencia de la crisis económica.

El protocolo de Kioto estableció mecanismos de flexibilidad para estabilizar las emisiones y cumplir los compromisos de reducción. Los instrumentos planteados por el protocolo de Kioto son el comercio de emisiones que permite el intercambio de créditos entre países para mejorar la eficiencia en el cumplimiento, el mecanismo de desarrollo limpio sirve para apoyar el crecimiento sostenible de los países en desarrollo mediante transferencia de tecnologías limpias, y el mecanismo de aplicación conjunta sirve para realizar inversiones en países con economía de transición.

2.3.3. El Acuerdo de París de 2015

El acuerdo de París es un acuerdo voluntario de reducción de emisiones adoptado en 2015. Su objetivo es mantener el aumento de temperatura media global por debajo de las 2 °C respecto a los niveles preindustriales, e intentar no superar un aumento de 1.5 °C. También pretende reducir los riesgos y los impactos de los daños en las zonas más vulnerables. El acuerdo de París es un acuerdo no vinculante en el

que cada país fija de manera voluntaria sus metas de reducción de GEI.

Las contribuciones de reducción de cada país se revisan cada 5 años a través del INDC (Intended nationally determined contributions), incrementando el compromiso de sus ambiciones y se pretende que los compromisos de reducción sean cada vez mayores.

El Acuerdo incluye mecanismos de facilitación, de transferencia tecnológica y de cooperación entre los distintos países, para la reducción de las emisiones, la adaptación al cambio climático aumentando la resiliencia y reduciendo la vulnerabilidad al cambio climático. También, señala la importancia de los ecosistemas y los bosques como sumideros de carbono.

El Acuerdo de París no considera explícitamente el papel de la agricultura en la reducción de emisiones globales, pero deja claro que la comunidad global debe abordar los efectos del cambio climático sobre la agricultura y conseguir una agricultura que soporte las perturbaciones y garantice la seguridad alimentaria a escala mundial (UNFCCC, 2015).

2.3.4. Cambio climático y políticas europeas

La Agencia Europea de Medio Ambiente señala que el Consejo europeo alertó en 2004 de la necesidad de adaptarse al cambio climático e incluir los riesgos climáticos en las estrategias nacionales del desarrollo rural (EEA, 2005). El directorado de Acción Climática fue creado en 2010 para llevar a cabo las políticas de cambio climático y las negociaciones internacionales. Por otra parte, la Política Agrícola Común (PAC) es una política clave para la protección del medio ambiente, e incluye normativa sobre cambio climático y medidas de control de la contaminación difusa. Estas políticas de mitigación y adaptación del cambio climático en la agricultura son complejas por la dificultad del control de la contaminación difusa. La preocupación de la Unión Europea por el medio ambiente ha aumentado en los últimos años y estableció un ambicioso objetivo de reducción de emisiones GEI del 20% en 2020 y del 40% en 2030. Para alcanzar estos objetivos, Europa se ha fijado algunos hitos intermedios y ha desarrollado un conjunto de políticas que se describen a continuación.

La política agrícola común (PAC)

La Política Agrícola Común (PAC) es una política importante en la Unión Europea. Fue creada en 1962 y se reformó en 1999, 2003 y 2013 para adaptarla a las presiones del comercio internacional, financieras y medioambientales. La PAC gestiona las subvenciones a la producción agrícola en la UE con el objetivo de incentivar progresivamente la sostenibilidad de la producción agrícola, la producción viable de alimentos, la conservación del medioambiente, el desarrollo sostenible de los recursos naturales y la protección de los ecosistemas. Estos objetivos tienen por finalidad reducir los impactos negativos medioambientales y la pérdida de la biodiversidad, y fomentar los positivos. De esta manera, la PAC incluyó aspectos medioambientales en su reforma del año 1999 a través del reglamento de desarrollo rural (1257/99) y del

reglamento horizontal (1259/99). Esta reforma potencio las ayudas directas a la renta para compensar la disminución de los precios internacionales, estableció el cumplimiento de las obligaciones ambientales, y el aumento de la competitividad de la agricultura europea.

La reforma intermedia de la PAC del 2003 tuvo como objetivo limitar el gasto agrícola, mantener las rentas agrarias mediante el pago único desacoplado de la producción, y la integración del medioambiente en la producción agraria mediante la condicionalidad (cross-compliance) de las ayudas al cumplimiento de requisitos medioambientales, de salud pública, y de bienestar animal.

Esta política está evolucionada y ha ido a una nueva dirección de una política más equitativa, más verde y más eficaz a través la reforma del año 2013. Esta última reforma tiene como objetivos la convención de las ayudas en un sistema multifuncional, la consolidación del segundo pilar de la PAC para desarrollo rural, la consolidación de la Organización Común de Mercado Única como red de seguridad cuando hay perturbaciones de los mercados, y la coordinación del desarrollo rural con los Fondos Estructurales. El pago único se sustituye por un sistema de pago que incluye el “pago básico”, el “pago verde” para bienes públicos medioambientales, el “pago distributivo” una ayuda para zonas desfavorecidas. El “pago verde” pretende preservar la biodiversidad y combatir el cambio climático con un mejor aprovechamiento de los recursos naturales. También se pretende la cooperación entre científicos y agricultores para el intercambio de conocimiento, la innovación, la modernización y la utilización de prácticas agrarias que tengan beneficios económicos y ambientales.

En España, el Ministerio de Agricultura señala que la PAC debe proteger el medio ambiente y que las ayudas fomentarán prácticas que reduzcan emisiones GEI y contribuyan a la lucha contra el cambio climático.

Paquete de energía clima 2013-2020

El consejo de la Unión Europea adoptó en 2009 un paquete legislativo de medidas sobre clima y energía para el año 2020 que tiene por finalidad combatir el cambio climático y promover las energías renovables. Los tres objetivos de este paquete son la reducción del 20% de las emisiones GEI respecto a 1990, alcanzan un 20% de energías renovables en el consumo de energía, y aumentar la eficiencia energética para ahorrar un 20% del consumo de energía. La realización de estas metas contribuirá a la seguridad energética de la UE, la generación de empleo, el crecimiento verde, y una Europa más competitiva.

Marco estratégico de energía y clima 2030

El marco estratégico 2030 se adoptó en 2014 y representa la continuidad del paquete anterior, para el horizonte 2030. Este marco estratégico establece una reducción de emisiones GEI del 40% respecto a 1990, lo que permitirá una contribución equitativa y ambiciosa de la UE al Acuerdo de París. Asimismo, se plantea que las energías renovables cubran el 27% del consumo, y un aumento de eficiencia energética

del 27%.

Hoja de ruta de la economía baja en carbono en 2050

La hoja de ruta 2050 para alcanzar una economía competitiva baja en carbono se elaboró en 2011. Todos los países deberán reducir sus emisiones para que el aumento de temperatura media global no rebase 2 °C. Esta propuesta señala que en 2050 la UE debe reducir sus emisiones un 80% respecto a los niveles de 1990. Para alcanzar este objetivo, la UE tendrá que conseguir reducciones del 40% y 60% en 2030 y 2040 respectivamente.

2.4. La agricultura y el cambio climático

La agricultura es una actividad humana vinculada con los recursos naturales (agua, suelo y biodiversidad) y con los factores climáticos y socioeconómicos, por lo que, su desarrollo depende de estas variables. Un cambio en los recursos naturales o en las condiciones climáticas o socioeconómicas, tanto a nivel local como global puede afectar al desarrollo del sector agrario. Además, el cambio climático es un gran desavío para la agricultura y la seguridad alimentaria por los impactos negativos sobre la productividad agrícola y ganadera. Los impactos del cambio climático sobre la agricultura varían según la localización geográfica y las características biofísicas y socioeconómicas de la región del mundo. Las actividades agrarias juegan un papel importante en la economía, pero también generan emisiones significativas de GEI a la atmosfera debido a la intensificación de la agricultura y la ganadería, con grandes cantidades de inputs como fertilizantes, herbicidas y pesticidas, y enormes cabañas ganaderas que generan estiércoles y emisiones por fermentación entérica. Por tanto, la agricultura contribuye a las emisiones GEI, pero también experimenta los daños del cambio climático.

Las causas principales del aumento de GEI del sector primario son el crecimiento de la población y la renta basada en el uso de combustibles fósiles. La población mundial alcanza los 7.600 millones de habitantes, con un crecimiento del 50% desde 1990. Las proyecciones muestran que la población crecerá 1.000 millones alcanzando los 8.600 en 2030, y llegará hasta 9.800 y 11.200 millones en 2050 y 2100, respectivamente (United Nations, 2017), (Figura 2.11). Este aumento de población provoca un incremento del consumo y de la demanda de alimentos (carne, hortalizas, leche, huevos...), y en especial de los productos ganaderos al aumentar la renta. Las estimaciones de producción mundial de carne muestran un aumento de 58 Mt en 2023 respecto a la década anterior, por el tirón de la demanda de los países en desarrollo que representarán aproximadamente el 78% de la producción adicional (OCDE-FAO, 2014). Otras causas de las emisiones GEI son la urbanización, la deforestación y la desertización que tiene como consecuencia la pérdida de las tierras agrícolas y junto a la desaparición de los ecosistemas.

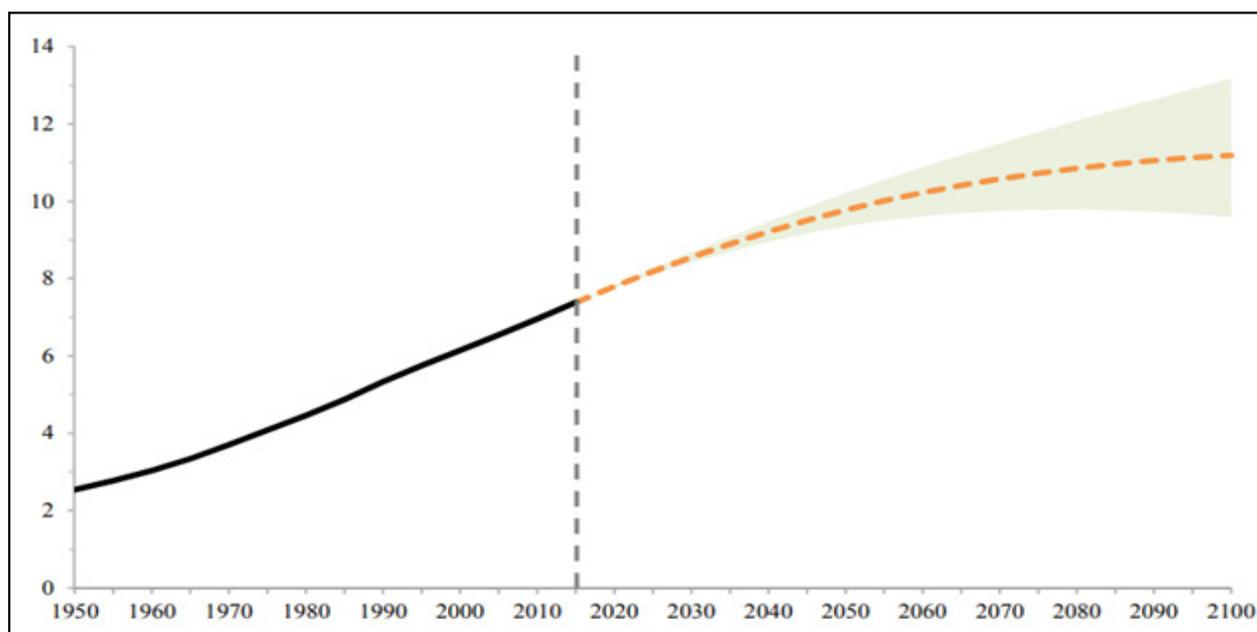


Figura 2.11. Tendencia y proyección de la población mundial hasta el 2100.

Fuente: United Nations (2017).

Las actividades agrarias ofrecen oportunidades de bajo coste para reducir y mitigar las emisiones en comparación con otros sectores de la economía (Bajzelj et al., 2014; Gernaat et al., 2015; Reisinger et al., 2013) y también pueden contribuir a proteger el medio ambiente. Dos importantes contribuciones a la mitigación en el sector son el control de las entradas de nitrógeno en los suelos, y la gestión de los bosques orientado a la captura de carbono.

2.4.1. Las fuentes de emisiones GEI de la agricultura

La agricultura es una fuente difusa de emisiones, por lo que no se puede identificar la localización y el volumen de la carga de emisiones en el origen. La contaminación difusa es un problema complejo que es muy difícil de controlar. Shortle y horan (2017) señalan que la contaminación de nitrógeno es un desavío enrevesado (Wicked challenge) para poder utilizar los instrumentos económicos como impuestos a la contaminación o mercados de emisiones. El principio de que contamina paga que promueve la Unión Europea no puede aplicarse a la contaminación difusa, y son necesarios instrumentos institucionales basados en la cooperación de los agentes. La progresiva intensificación de las actividades agrícolas tanto en capital como en inputs genera mayores emisiones contaminantes que dañan el medioambiente. Las principales emisiones del sector agrario de GEI son el óxido nitroso y el metano, y las emisiones indirectas de dióxido de carbono de maquinaria (Figura 2.12).

Según Smith et al. (2014) y Tubiello et al. (2015), el uso de la tierra supone el 25% de las emisiones antropogénicas de GEI, de las que el 12% son emisiones de la producción agrícola y ganadera y el resto son la deforestación (13%).

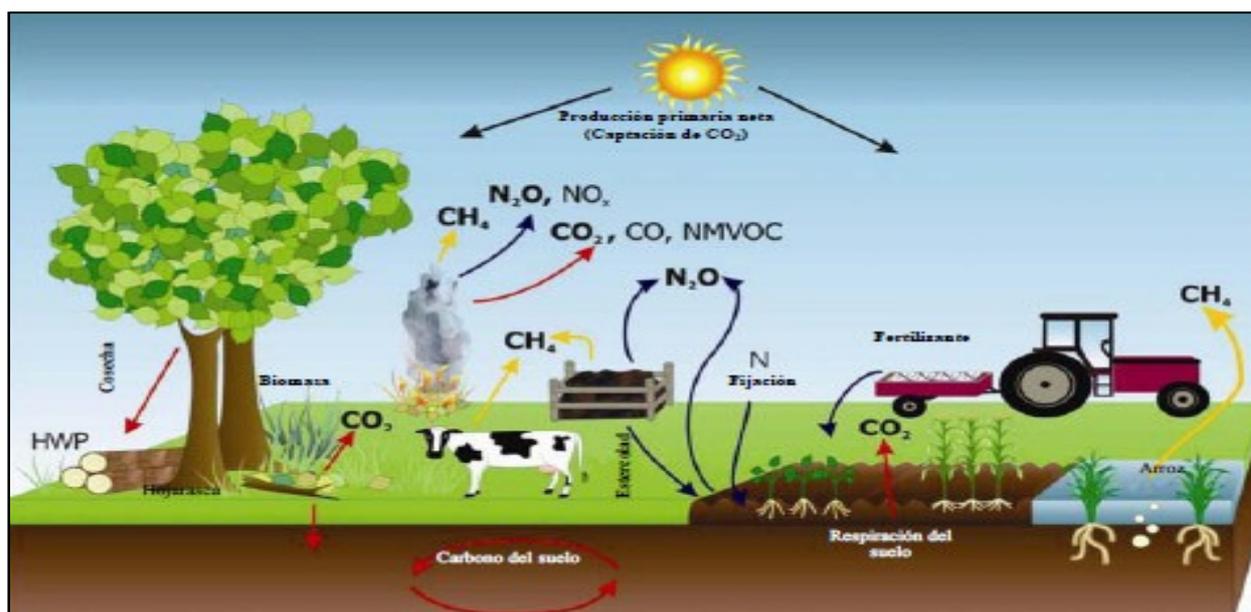


Figura 2.12. Principales emisiones de GEI en el sector agrícola.
Fuente: IPCC (2006).

El sector ganadero comprende unos 1.300 millones de productores y minoristas que generan el 50% del PIB agrícola global y unas emisiones GEI de unos 7 GtCO₂e (Thorton, 2010; FAO 2006, 2009).

Las emisiones del sector agrícola en España representan el 10% de las emisiones, y las emisiones del sector agrario en Aragón representan el 21% de la región (3,5 MtCO₂e) y el 11% del total de emisiones del país (IAEST, 2017a).

2.4.1.1. Las emisiones del óxido nitroso

El óxido nitroso es un gas de efecto invernadero que contribuye un 6% al calentamiento global. Permanece en la atmósfera unos 120 años con un potente efecto de atrapamiento de calor y con un papel importante en la eliminación del ozono estratosférico (Ussiri y Lal, 2013).

Las emisiones del óxido nitroso (N₂O) son las principales emisiones GEI de la agricultura y se genera en los suelos durante los procesos de nitrificación y de desnitrificación como consecuencia de la utilización de los fertilizantes sintéticos o el abonado orgánico. Las emisiones pueden ser directas desde los suelos, o indirectas por escorrentía y lixiviación del nitrógeno. La actividad microbiana, la respiración de las raíces, los procesos de descomposición química, así como la respiración heterotrófica de la fauna y los hongos participan en la producción de GEI de los suelos (Chapuis-Lardy et al., 2007).

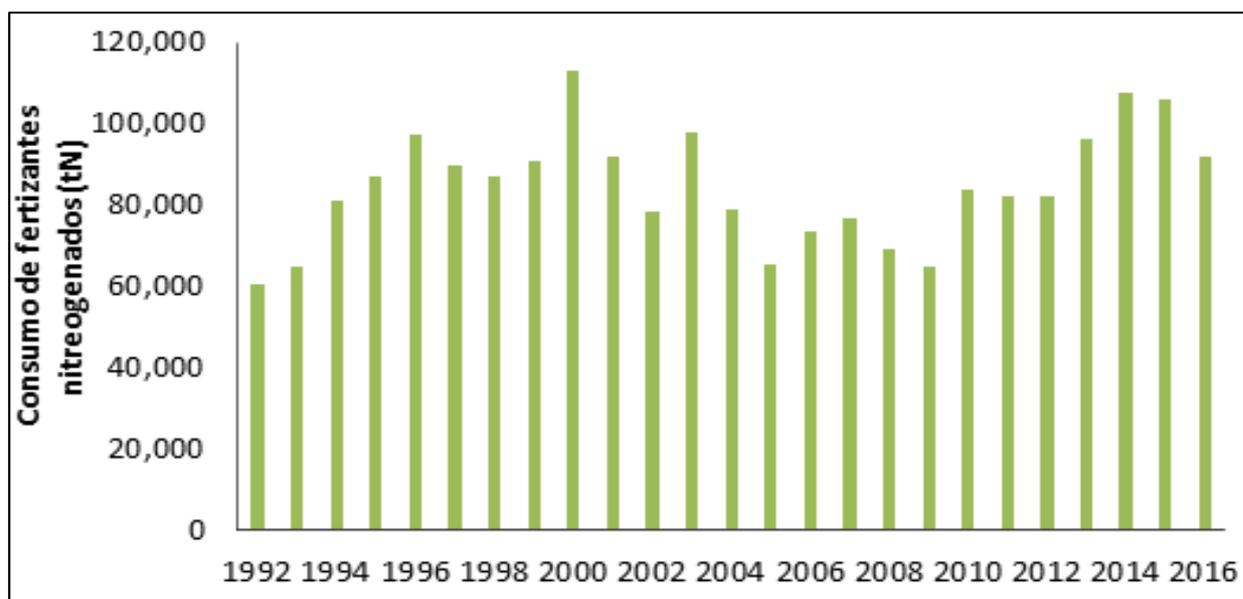


Figura 2.13. Consumo de fertilizantes nitrogenados inorgánicos en Aragón (tN).

Fuente: IAEST (2017b).

Las emisiones del óxido nitroso de los fertilizantes nitrogenados en Aragón alcanzan un millón de tCO₂e, de las que el 70% son emisiones directas de los suelos agrícolas y el 30% emisiones indirectas (Kahil y Albiac, 2012). Estas emisiones del N₂O dependen de la cantidad de nitrógeno aplicada en los distintos cultivos. En la figura 2.13 se observa que la utilización de fertilizantes nitrogenados minerales en Aragón ha variado a lo largo del tiempo con un aumento de 60.000 a 90.000 toneladas de fertilizantes entre 1992 y 2016. La fertilización disminuyó entre 2000 y 2009, pero posteriormente aumenta. Este incremento está fortalecido por la reforma del PAC del año 2013 que incentiva a la modernización y la intensificación de las prácticas agrarias que requieren más fertilizantes y combustibles fósiles para conseguir un sector agrícola más competitivo, con más fertilizantes y emisiones.

Orús (2006) señala que la cantidad óptima de abonado nitrogenado es inferior a lo que aplican los agricultores, y estima que la fertilización nitrogenada supera en un 20% las necesidades de los cultivos. Además, la disponibilidad de fertilización orgánica podría cubrir las necesidades de nitrógeno de todos los cultivos, sustituyendo completamente a la fertilización mineral.

La nitrificación y la desnitrificación son los dos principales procesos en el suelo que emiten N₂O y NO. El óxido nitroso (N₂O) se genera por desnitrificación en condiciones anaeróbicas en espacios porosos llenos de agua donde la humedad (WFPS; Water filled pore space) supera el 50% (Ussiri y Lal, 2013). La cantidad de NO por desnitrificación es insignificante en comparación con el NO que genera la nitrificación (Bruemmer et al., 2008), (Figura 2.14).

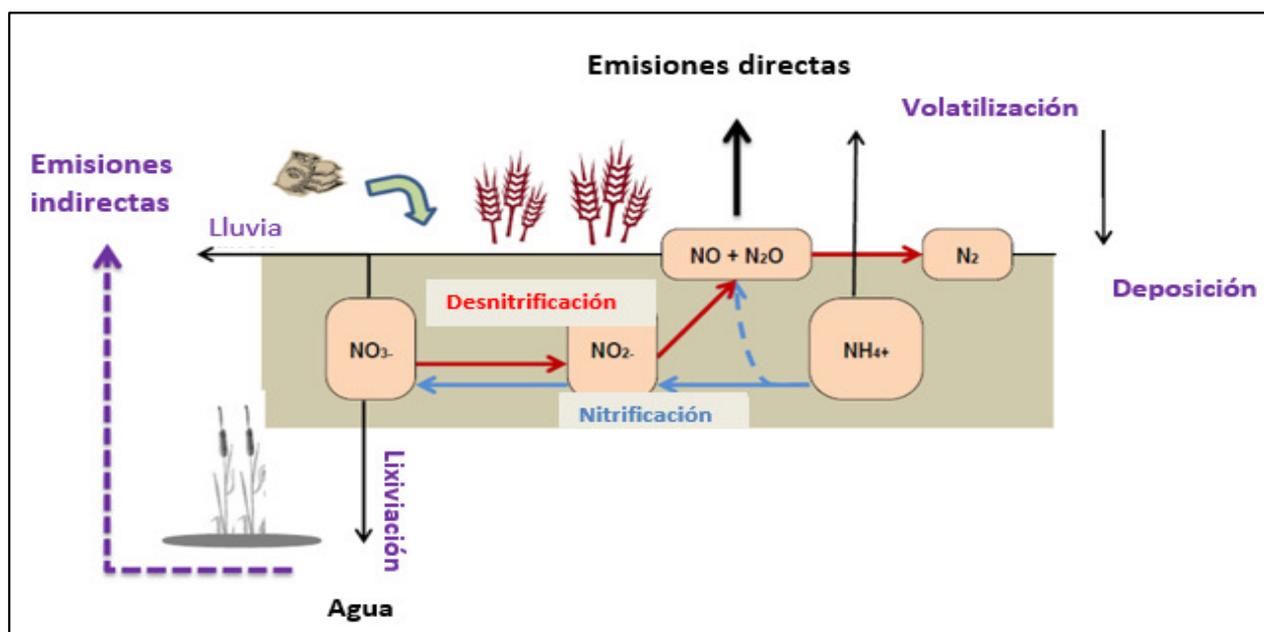


Figura 2.14. Los procesos de nitrificación y desnitrificación en el suelo.

Fuente: Pellerin et al. (2017a).

La nitrificación es la oxidación del amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-) a través del nitrito (NO_2^-) asociados a bacterias del género nitrosomonas (NH_4^+ hacia NO_2^-) y nitrobacter (NO_2^- hacia NO_3^-). Ambas etapas se producen en condiciones aeróbicas (Ussiri et Lal, 2013) y son fuertemente dependientes de la temperatura y la humedad del suelo. Un suelo con mayor cantidad de oxígeno y menor cantidad de agua en los poros muestra mayores emisiones por nitrificación.

La desnitrificación es el principal proceso de generación de emisiones directas de GEI de origen agrario. La desnitrificación es un proceso que ocurre frecuente en otoño e invierno potenciado por la lluvia. Es un proceso biológico de reducción de nitratos y liberación de óxido nitroso a la atmósfera (Rauschkolb et al., 1994) asociado a bacterias del tipo pseudomonas, bacillus, paracoccus y rhizobium. Estas bacterias pueden funcionar en condiciones aérobicas y anaeróbicas, y utilizar el nitrato en ausencia de oxígeno.

Según Bruemmer et al. (2008), las emisiones del óxido nítrico (NO) disminuyen cuando la humedad del suelo (WFPS) es inferior al 10%. Asimismo, las emisiones del óxido nitroso serán mayores con humedad superior al 60% y menores con humedad inferior al 30% (Gao et al., 2014), (figura 2.15).

Las emisiones indirectas de nitrógeno son consecuencias de las pérdidas de N por escorrentía y lixiviación, que también generan los procesos de nitrificación y desnitrificación. Bouwman (1990) señala que las emisiones indirectas son similares en magnitud a las emisiones directas de los suelos agrícolas. Existen otras fuentes de emisiones de óxido nitroso en el sector agrícola como la mineralización de los suelos orgánicos, los residuos de los cultivos, y el manejo y almacenamiento del estiércol.

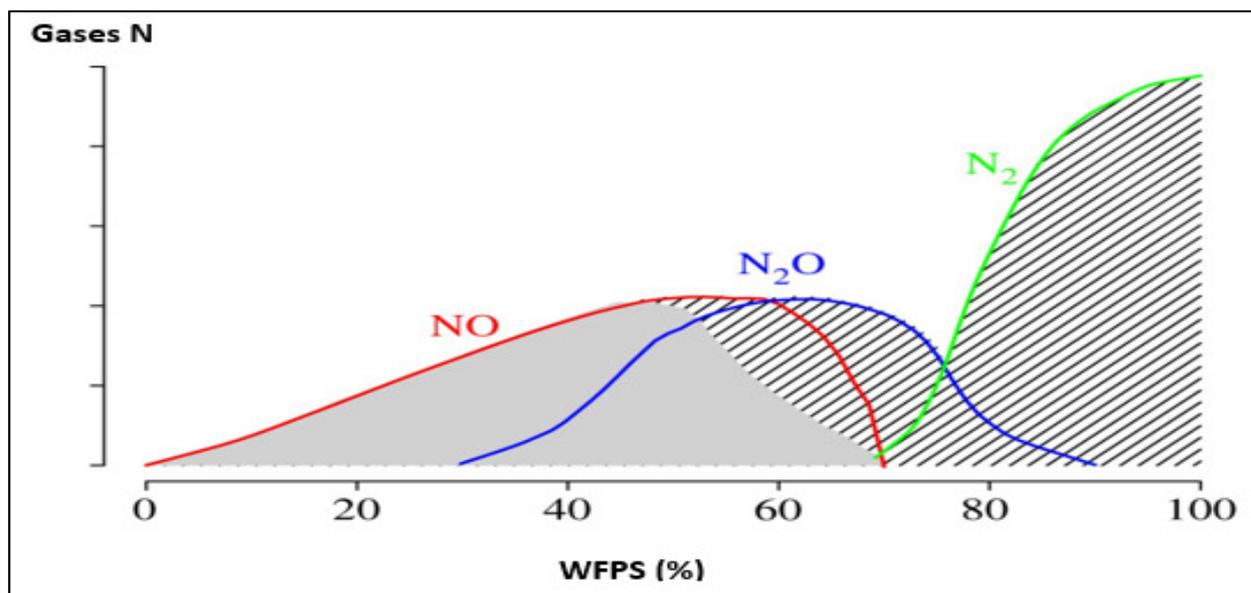


Figura 2.15. Contribución de los procesos de nitrificación y desnitrificación a las emisiones de nitrógeno según la humedad del suelo⁶.

Fuente: Pilegaard (2013).

La gestión del estiércol sólido y líquido genera emisiones de óxido nitroso que varían significativamente según el tipo de sistema de manejo de estiércol utilizado. La estimación de las emisiones del óxido nitroso del manejo del estiércol se basa en los valores de excreción de nitrógeno por tipo de animal, y en factores de emisión del sistema de manejo de estiércol (FES) (Cuadro 2.1). En España, las emisiones de óxido nitroso del manejo de estiércol alcanzan 1,8 MtCO₂e en 2015. El nitrógeno excretado por los animales también provoca emisiones indirectas en los procesos de transporte y destino del nitrógeno por lixiviación y escorrentía.

Cuadro 2.1. Factores de emisión del N₂O según el sistema de manejo de estiércol.

Sistemas de manejo de estiércol	FES (Kg N ₂ O-N/Kg Nitrógeno excretado)
Pasto/ Prado/ Pradera	0,02
Almacenaje de solidos	0,02
Aplicación diaria	0
Sistemas de tipo liquido con y sin costera	0,001
Lagunas anaeróbicas	0,001 (<0,002)
Tratamiento aeróbico (aireación)	0,02
Otros sistemas	0,005

Fuente: IPCC (2000).

2.4.1.2. Las emisiones de metano

El metano es uno de los tres principales gases de efecto invernadero. Las emisiones de la agricultura y la ganadería se generan por la fermentación entérica en el proceso digestivo de los rumiantes, el manejo del

⁶ El proceso de nitrificación se representa con sombreado gris sólido y la desnitrificación con sombreado rayado.

estiércol, y el cultivo del arroz.

La ganadería es la principal fuente de emisiones de metano debido a la fermentación entérica y el almacenamiento de estiércol generado el 33% de las emisiones. El mecanismo de la fermentación entérica se produce en los rumiantes como bovino y ovino, que representan el 90% del total de las emisiones de metano entérico (Monteny et al., 2006). El metano es un subproducto de la fermentación microbiana de los hidratos de carbono en el rumen. La fermentación entérica es la descomposición de los hidratos de carbono a ácidos grasos volátiles (AGV) por la acción de microorganismos en condiciones anaeróbicas. Durante la descomposición de los hidratos de carbono y la formación de acetato y butirato se pierden moléculas de carbono que originen la formación de CO₂. Además, la fermentación de los hidratos provoca la oxidación de los cofactores reducidos y la formación de hidrógeno en el rumen por reacciones de deshidrogenación que utilizan microbios denominados archaea metanogénica para reducir el carbono del CO₂ a CH₄ (Moss et al., 2000), (Figura 2.16), de acuerdo con las siguientes reacciones:



Las emisiones del metano de la fermentación entérica dependen del tipo de animal, el peso del animal, la tasa de crecimiento, y la cantidad y calidad de los alimentos. La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2014a, b, c) estima los factores de emisiones según el tipo de animal (Cuadro 2.2).

Las emisiones de metano de la fermentación entérica presentan importantes variaciones espaciales, en función de los sistemas de producción y las características territoriales. En España, las emisiones de la fermentación entérica alcanzan 14,4 MtCO₂e en 2015 (MAPAMA, 2017a). Para Aragón, Kahil y Albiac (2012) estiman en 480.000 tCO₂e las emisiones de la fermentación entérica.

Cuadro 2.2. Factores de emisión del CH₄ de la fermentación entérica (España).

Tipo de animal	FEA (kg CH ₄ /cabeza/año)
Vacuno de leche	103
Vacuno de carne	41,8
Ovino	8,64

Fuente: EEA (2014a).

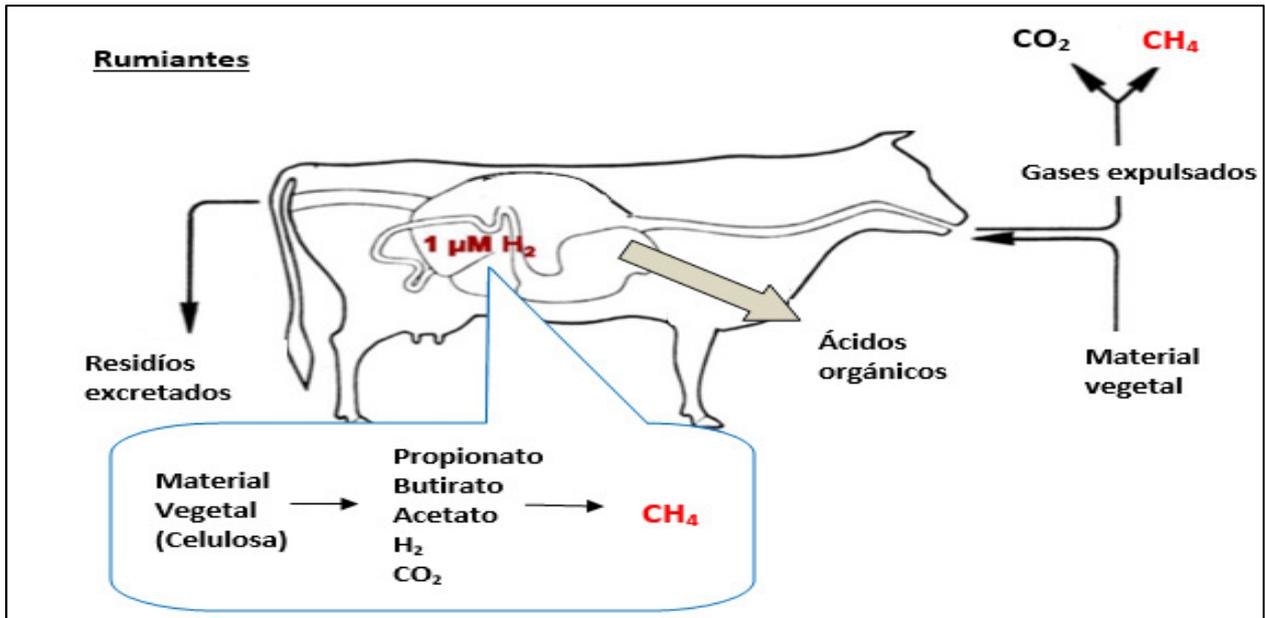


Figura 2.16. La fermentación entérica de los rumiantes.

Fuente: Duin et al. (2016).

La gestión de estiércol es una fuente importante de emisiones de metano a la atmósfera por la actividad microbiana metanogénica bajo condiciones anaeróbicas, durante su manejo y su almacenamiento (Montes et al., 2013). El proceso de metanogénesis es un mecanismo bioquímico complejo que depende de las interacciones entre los factores ambientales, y las características fisicoquímicas de las muestras y de la comunidad microbiana. Además, la cantidad de metano producida depende del número de animales, la cantidad de estiércol, el tipo de gestión del estiércol, la temperatura, la humedad, y la duración del almacenamiento. De acuerdo con el informe de Holly et al. (2017), las emisiones de metano del estiércol de vacuno de leche almacenado durante 6 meses a temperaturas entre 1 a 18 °C se reducen un 25%, mientras Külling et al. (2002) señala que las emisiones de metano se reducen un 20% en un periodo de almacenamiento de 49 días y a temperatura de 20 °C. Estos resultados muestran que la temperatura y el tiempo influyen sobre el potencial de las emisiones de metano.

Las emisiones de metano son mayores cuando el estiércol se maneja en forma líquida en instalaciones como lagunas y tanques. Por otra parte, Rico et al. (2012) señalan que la relación entre la comunidad microbiana y las características fisicoquímicas y sus efectos combinados en la emisión de metano es muy diferente entre un estiércol sólido con menos humedad y un estiércol líquido. La estimación de las emisiones de metano procedentes de los sistemas de manejo de estiércol depende del tipo de animal, Por lo que, la EEA estima los factores de emisión por cada tipo de animal (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Factores de emisión del CH₄ del manejo de estiércol.

Tipo de animal	FEM (kg de CH ₄ /cabeza/año)
Vacuno de leche	72,7
Vacuno de carne	2,7
Porcino	9,39
Ovino	0,23
Gallinas	0,01

Fuente: EEA (2014b).

Las emisiones de metano procedentes del manejo de estiércol en España alcanzan los 8,5 MtCO₂e en 2015 (MAPAMA, 2017a), y las emisiones de metano en Aragón se estiman en 1,8 MtCO₂e en 2008 (Kahil y Albiac, 2012).

2.4.1.3. Las emisiones de dióxido de carbono

Las emisiones de dióxido de carbono se generan por el uso de combustible fósil dentro y fuera de las explotaciones, y también por el transporte de inputs y productos agrícolas (Stern, 2007). La variación del stock de carbono en el suelo genera emisiones de CO₂ por el cambio del uso de tierra o por las prácticas agrarias de manejo de suelo, como el laboreo que favorece el aumento del oxígeno que disminuye la captura de carbono en el suelo.

Los cambios de uso de la tierra, en especial la deforestación, generan emisiones de CO₂ y reducen el contenido de carbono en el suelo, como consecuencia de la reducción de las entradas de biomasa vegetal en el suelo y de la descomposición rápida de materia orgánica en los suelos agrícolas.

La figura 2.17 es un ejemplo que presenta el origen de las emisiones de dióxido de carbono en Australia y muestra que la quema de combustibles fósiles es el principal responsable del aumento de emisiones de CO₂, seguido del cambio en el uso de tierra. También se observa que el 30% de las emisiones de CO₂ antropogénicas son absorbidas por el océano, el 30% por la tierra, y el 40% se queda en la atmósfera.

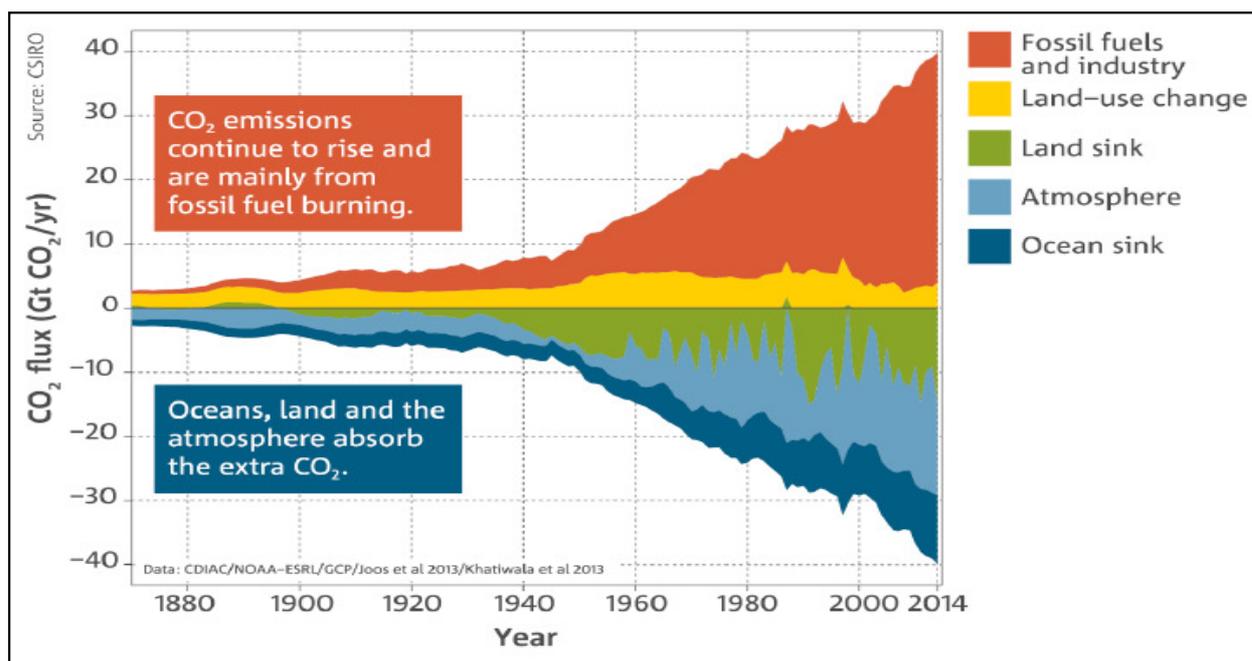


Figura 2.17. El cambio del uso de tierra es una fuente de las emisiones de CO₂ en Australia.
Fuente: CSIRO y Bureau of Meteorology (2016).

2.4.2. Impacto del cambio climático sobre la agricultura

La variabilidad del clima tiene impactos negativos sobre la agricultura y su sostenibilidad. El cambio en los patrones de temperaturas y de precipitación afectará a la productividad y la calidad de los cultivos generando pérdidas económicas. Según Stern (2007), el cambio climático tendrá impactos biofísicos, ambientales y socioeconómicos con un coste muy elevado. También puede haber ciertos efectos positivos sobre los cultivos por el aumento de la concentración de CO₂, aunque Zhu et al. (2018) señalan la mayor concentración de CO₂ provocará una reducción significativa del contenido proteínas, micronutrientes y vitaminas en el arroz y los cereales.

Según la EEA (2012) e Iglesias et al. (2011), la gestión de los recursos hídricos en las regiones mediterráneas se enfrenta a desafíos importantes ante el cambio de patrones de lluvia y temperatura, con aumentos significativos de la demanda de riego. Los cambios de uso de tierra también suponen un desafío para la gestión del agua, especialmente en las zonas de fuerte escasez de agua.

El cambio climático reducirá la productividad de los cultivos y de la ganadería por el aumento de temperaturas y la modificación del patrón de lluvia. La mayoría de los estudios (Schlenker et al., 2006; Welch et al., 2010; Fisher et al., 2012; Chen et al., 2015; Burke y Emerick., 2016) se concentran en los efectos de precipitación y de temperatura sobre el sector agrario, pero ignoran los efectos de otras variables climáticas (humedad, saturación del suelo, viento, y evaporación). Otros autores como Hoffman y Jobes (1978); Batchelor y Roberts (1983) analizan otros factores climáticos asociados al crecimiento de las plantas que afectan a la productividad de los cultivos. Los trabajos de Hoffman y Jobes (1978) y Sadras

y Milroy (1996) muestran que la humedad afecta directamente el contenido de agua de la planta e indirectamente al crecimiento, la fotosíntesis, la polinización y puede provocar enfermedades. El incremento de temperaturas aumenta la evapotranspiración de la planta (Roderick y Farquhar, 2002) y las pérdidas en el almacenamiento y transporte de agua a los campos de cultivo (Wallace, 2000). Otros trabajos analizan los impactos del cambio climático junto a los efectos del cambio del uso de tierra. (Carvalho-Santos et al., 2016; Rodríguez-Lloveras et al., 2016).

En la cuenca mediterránea, la agricultura es un sector importante en términos de empleo, participación en el PIB y tamaño de la población rural. El medio rural del área mediterránea es muy vulnerable al cambio climático por su fuerte dependencia de la agricultura y de los recursos naturales.

Las proyecciones futuras del clima en las regiones mediterráneas muestran un aumento de intensidad de los fenómenos extremos y de temperatura elevada que provocarán sequías y la disminución del agua disponible (Collins et al., 2013).

Efectos de los cambios de los patrones de lluvia

El cambio espacio-temporal en los patrones de precipitación provocará impactos como el aumento de fenómenos meteorológicos extremos (olas de calor, inundaciones...), el incremento de precipitaciones torrenciales y la disminución del agua disponible, con un fuerte desajuste entre oferta y demanda del agua y la extensión de la sequía y un mayor contraste estacional entre las estaciones húmedas y secas. El aumento de demanda de agua agota las aguas superficiales e intensifica la extracción de aguas subterráneas vaciando los acuíferos, en especial en las zonas áridas y semiáridas. Barnett et al. (2005) señala que en las cuencas que reciben agua de deshielo se observan menores caudales especialmente en verano. Estas condiciones provocarán pérdidas de producción agrícola, y alteraciones en los ecosistemas acuáticos. El cambio en las precipitaciones afectará al crecimiento de las plantas, tanto la floración como la polinización. Por tanto, la variabilidad interanual de precipitaciones es un factor importante del crecimiento de los cultivos y su productividad (AEA, 2007).

Iglesias et al. (2007) señalan que los cambios en las precipitaciones provocarán el aumento de la salinización y de los procesos de erosión, el incremento de la frecuencia de las sequías, y mayores problemas de malas hierbas, plagas y enfermedades.

La disminución de la producción y de la cobertura vegetal en el suelo facilitará la erosión degradando la calidad del agua. Algunos estudios se centran en los impactos del cambio climático sobre la cantidad del agua disponible (Garrote et al., 2016; López-Moreno et al., 2014; Mourato et al., 2015), y otros trabajos examinan el impacto sobre la cantidad y la calidad del agua (Bangash et al., 2013; Carvalho-Santos et al., 2016). La calidad del agua superficial y subterránea ha empeorado por la intensificación de la agricultura y el uso de fertilizantes y pesticidas. La mayor escasez de agua supondrá un aumento de la concentración

de nutrientes y contaminantes orgánicos en el suelo y un deterioro de sus características físicas, químicas y biológicas produciendo la caída de rendimientos, el abandono de cultivos y tierras agrícolas, y la pérdida del valor económico de la tierra.

Efecto de los cambios de la temperatura

La temperatura es un factor importante en el sector agrario y su productividad. Temperaturas elevadas aumentan la evaporación y evapotranspiración, y las necesidades de riego, aún mayores si disminuyen las precipitaciones. El calor excesivo reduce las aguas superficiales y subterráneas disponibles contribuyendo a una mayor escasez de agua. La falta de agua debilita los cultivos, lo que favorece la aparición de malas hierbas, plagas y enfermedades.

La elevada temperatura del agua y de los lagos disminuye la concentración de nutrientes en la capa superficial y el contenido de oxígeno en las capas de aguas profundas debido al aumento de la tasa de respiración biológica alterando la calidad del agua. El calentamiento afecta a los ecosistemas acuáticos provocando alteraciones en la distribución espacial de los organismos y de sus hábitats, y cambios fenológicos en muchas especies causando su desplazamiento espacial y la extinción de las que son más vulnerables. Los ecosistemas terrestres reducirán sus áreas de distribución y las especies arbóreas se verán amenazadas por los incendios y desertificación.

Las altas temperaturas y la disminución de precipitaciones tienen un efecto negativo sobre el ganado por la disminución de producción forrajera tanto en cantidad como en calidad, lo que acortará su periodo de pastoreo especialmente en las zonas mediterráneas. El incremento de la temperatura provocará cambios en la dinámica de la nieve y estimulará la fusión del hielo de los glaciares acumuladas en la montaña, con disminución de la masa glaciar con menor disponibilidad de agua durante los periodos de demanda elevada.

El cambio climático y del uso de la tierra tendrá impactos significativos sobre el medio ambiente y los recursos naturales, amenazando la sostenibilidad de la agricultura y el bienestar de la sociedad. López-Moreno et al. (2014) muestran que los cambios del uso de la tierra tienen impactos sobre el medio ambiente similar al cambio climático. La adaptación requerirá modificar las infraestructuras de suministro de agua para que sean más eficientes, y promover cambios en el uso de suelo que disminuyan la lixiviación y el transporte de sedimentos y nutrientes.

El planteamiento de estrategias de adaptación en el sector agrícola frente al cambio climático tiene como objetivos proteger el medio ambiente y los recursos naturales, gestionar los riesgos y las amenazas del cambio climático, ajustar las actividades económicas, y estabilizar el nivel de las emisiones para reducir la vulnerabilidad e incrementar la seguridad a los agricultores. Estos objetivos contribuyan a lograr un desarrollo sostenible a largo plazo.

En el diseño de las políticas de mitigación y adaptación, es necesario tener en cuenta los cambios de los factores climáticos y sus impactos sobre los sistemas biofísicos y socioeconómicos a diferentes escalas. Las políticas deben conseguir la acción colectiva mediante la cooperación entre los grupos de interés para reducir las emisiones y adaptarse a los efectos del cambio climático. Las estrategias de mitigación y adaptación tienen que ser aceptables por los grupos de interés y eficientes con unos costes razonables. Stern. (2007) señala que los costes de estabilización de las emisiones GEI entre 450 y 550 ppm de CO₂e representan el 1% del PIB mundial.

2.4.3. La contribución de la agricultura en la mitigación del cambio climático

Las actividades agrícolas, ganaderas y forestales son una de las fuentes de emisiones GEI, pero también son fuentes de oportunidades de bajo coste para mitigar estas emisiones en comparación con otros sectores económicos.

En las actividades agrarias, el manejo del suelo tiene una gran importancia en las emisiones del óxido nítrico y en el contenido de carbono en el suelo. Por tanto, un mejor manejo del suelo puede reducir sustancialmente las emisiones GEI, incrementar el secuestro de carbono en el suelo a través de la absorción de CO₂ por las plantas, aumentar la cantidad de materia orgánica en el suelo, y ajustar el ciclo de nitrógeno del suelo. Estas mejoras favorecen una mayor fertilidad y productividad, y una mayor biodiversidad del suelo, y una menor erosión, escorrentía y contaminación de la atmósfera y el agua.

El secuestro de carbono en el suelo varía en función de muchos factores como el historial de uso del suelo, la naturaleza del suelo, las condiciones climáticas, el tipo de cultivo, y las prácticas de gestión aplicadas. La captura de carbono del suelo varía entre 0,1 y 1 Mg C por hectárea y año, y es menor en tierras de uso agrícola que en la restauración de tierras en pastizales o bosques (Smith et al., 2014; Ogle et al., 2005).

Hay varias prácticas de manejo del suelo que incrementan el secuestro de carbono: la rotación de cultivos (Burney et al., 2010), la aplicación de residuos (Wilhelm et al., 2004), la utilización de variedades eficientes con una mayor masa de raíces (Kell, 2012), los cultivos cubierta (Poeplau y Don, 2015), la reducción de laboreo o el no laboreo (Olge et al., 2005), (Figura 2.18).

En el sector ganadero también se pueden aplicar intervenciones técnicas y cambios estructurales en los sistemas de producción ganaderos para reducir las emisiones. Las opciones de mitigación reducen las emisiones de fermentación entérica y las emisiones de manejo de estiércol, incrementan el secuestro de carbono en los pastizales, y favorecen una producción ganadera sostenible.

Según Herrero et al. (2016), la ganadería tiene un gran potencial de mitigación técnico que representa casi la mitad del potencial de mitigación del sector agrícola y forestal, pero su potencial económico no se conoce bien y representa menos del 10% de lo que es técnicamente posible. Este bajo

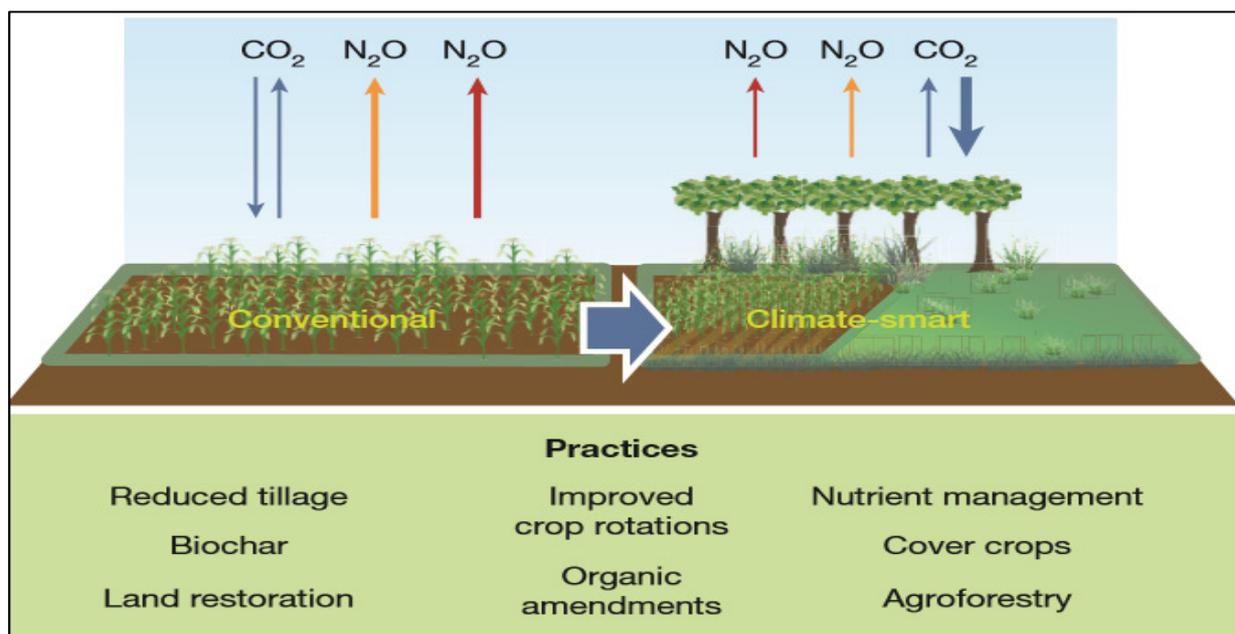


Figura 2.18. La agricultura inteligente reduce las emisiones GEI e incrementa el secuestro de carbón.
Fuente: Paustian (2016).

potencial económico se explica por las limitaciones de adopción de las medidas, los costes elevados y las fuertes compensaciones para la implementación.

Dentro del sector ganadero se puede aplicar varias prácticas de mitigación basadas en la dieta de los animales y en el almacenamiento de estiércol. Las prácticas de reducción de las emisiones ganaderas pueden mitigar entre 0,01 y 0,5 GtCO₂e por año (Herrero et al., 2016). FAO (2013) realiza una descripción de todas las opciones de mitigación y concluye que la mejora de la calidad de forraje, la eficiencia general del uso de nutrientes en la dieta, y la optimización de la productividad animal son medidas efectivas para disminuir las emisiones GEI. Pero, estas prácticas pueden no ser viables económicamente porque aparecen efectos negativos debido a la complejidad de las interacciones entre los componentes individuales de los sistemas de producción pecuaria. La utilización de complementos alimentarios puede tener efectos negativos a largo plazo o también puede ser una medida eficaz para reducir las emisiones de fermentación entérica, pero como aumentan el sustrato fermentable favorecen las emisiones del estiércol. Por ello, se deben plantear medidas eficientes que reduzcan las emisiones GEI sin afectar a los animales y su productividad.

Algunos estudios plantean prácticas eficientes de reducción de las emisiones GEI. Así, Thornton y Herrero (2010) muestran que la adopción de pastos mejorados, la intensificación de las dietas de los rumiantes, y el cambio de razas tienen un potencial de mitigación máximo en los sistemas pecuarios que supone el 7% del total del potencial de mitigación de la agricultura hasta 2030 en los sistemas tropicales. Asimismo, Hristov et al. (2015) muestran que la utilización de inhibidores de metano como el 3-

nitrooxypropanol (3NOP) puede reducir el 30% de las emisiones de metano de la fermentación entérica, con un aumento del 80% en el peso sin afectar la producción de leche.

También, Beauchemin et al. (2008) y Martin et al. (2010) muestran que la adición de 1% de lípidos en la dieta de los rumiantes reduce las emisiones de metano de fermentación entérica en un 5%, genera un aumento de la densidad de energía en la dieta, y mejora el rendimiento de leche y su composición en ácido graso (Ashes et al., 1997). La adición de lípidos en la dieta de los rumiantes no debe superar el 5-6% porque la alta cantidad de lípidos puede deprimir la degradación de la fibra en el rumen haciendo una difícil la digestión, la producción de acetato y el contenido de grasas en la leche (Dong et al., 1997; Ashes et al., 1997).

El manejo forestal y el almacenamiento de carbono en los bosques y matorrales pueden ser también una propuesta efectiva de captura de carbono para mitigar los efectos del cambio climático, y mejorar la provisión de servicios ecosistémicos (Bravo et al., 2007; Ruiz-Peinado et al., 2017).

La captura de carbono de los bosques es consecuencia de la fotosíntesis que absorbe dióxido de carbono de la atmósfera (Ruiz-Peinado et al., 2017). La cantidad de carbono fijada por los bosques se almacena en la biomasa en forma de madera, y también en la fijación de carbono en el suelo (Magnússon et al., 2016).

Pan et al. (2011) estiman el stock mundial de carbono forestal en unos 861 Pg de carbono en 2011, con un 44% en el suelo hasta una profundidad de 1m, un 42% biomasa, un 8% madera muerta, y un 5% residuos. El potencial bruto de sumidero de carbono de los bosques del mundo alcanza los 2,4 Pg de C por año, pero la captura neta de los bosques es 1,1 Pg de C por año debido al cambio de uso de tierra. Le Quere et al. (2015) estiman una captura neta mayor de los bosques de entre 2,3 y 3 Pg de C por año.

Varias opciones de manejo forestal incrementan la biomasa y el carbono en las masas forestales como la intensificación de las claras, la entresaca, el aprovechamiento de los restos de la corta, la modificación del turno y la utilización de esquejes de regeneración. Estas estrategias protegen el suelo, reducen el riesgo de fuego, favorecen la estabilidad biológica, mejoran el estado sanitario de las plantas e incrementan el valor de los productos.

2.5. Marco teórico para el control de las emisiones contaminantes

El marco teórico para el control de las emisiones contaminantes tiene una gran importancia para el análisis de políticas, y es necesario para un apropiado diseño e implementación de las políticas de mitigación y adaptación. En este apartado se definen los fallos de mercado para los bienes públicos y las externalidades, el nivel eficiente de contaminación, y los instrumentos de control de la contaminación en la economía medioambiental.

El medio ambiente es un sistema complejo que provee bienes y servicios que tienen en su mayoría características de bien público, por la no rivalidad y la no exclusión. El problema del medio ambiente es que los mercados fallan en la asignación de recursos en el caso de bienes públicos y no se logra un equilibrio en el que el bienestar social es óptimo. En los bienes públicos, los consumidores minimizan su disposición a pagar por ellos y dejan que otros consumidores paguen por el bien. Este comportamiento optimista se define como “polizón o free rider”, y se observa en muchos tipos de agentes en el problema del cambio climático.

El sector agrícola es una fuente de emisiones GEI que contribuye a la contaminación del aire y de los recursos hídricos. El uso intensivo de los recursos naturales suelo y agua contribuye a su deterioro y su degradación. Por tanto, la contaminación causada por las emisiones o la mala utilización de los recursos naturales se consideran como una externalidad negativa que daña el entorno natural, las actividades económicas, y el bienestar social.

Las externalidades se definen como los efectos positivos o negativos de un consumidor o productor sobre el bienestar de otros consumidores o productores, que son externos a los mercados, y para lo que no hay formación de precios. Orfila (2007) señala que una externalidad es “un problema de costes cuando los costes privados y los costes sociales difieren”, esto implica que el coste del daño (CME) es la diferencia entre el coste marginal social (CMS) y el coste marginal privado (CMP). Para resolver este problema de contaminación, es necesario que los agentes que generan la externalidad negativa tengan en cuenta los efectos de sus actos y compensen su externalidad a los agentes perjudicados internalizando el daño (Figura 2.19).

La internalización de los daños de contaminación se realice de forma que el bienestar social sea máximo⁷. Para ello el nivel eficiente de la contaminación (E) es el nivel que maximiza el beneficio neto BN, es decir cuando el beneficio marginal privado de contaminación y el coste marginal social de contaminación sean iguales.

$$BN(E) = B(E) - D(E) \quad (3)$$

$$\frac{\partial BN(E)}{\partial E} = \frac{\partial B(E)}{\partial E} - \frac{\partial D(E)}{\partial E} = 0 \quad (4)$$

⁷ En este caso, el bienestar social BS es la diferencia entre el beneficio privado de la actividad contaminante B(E) y los costes de daño D(E).

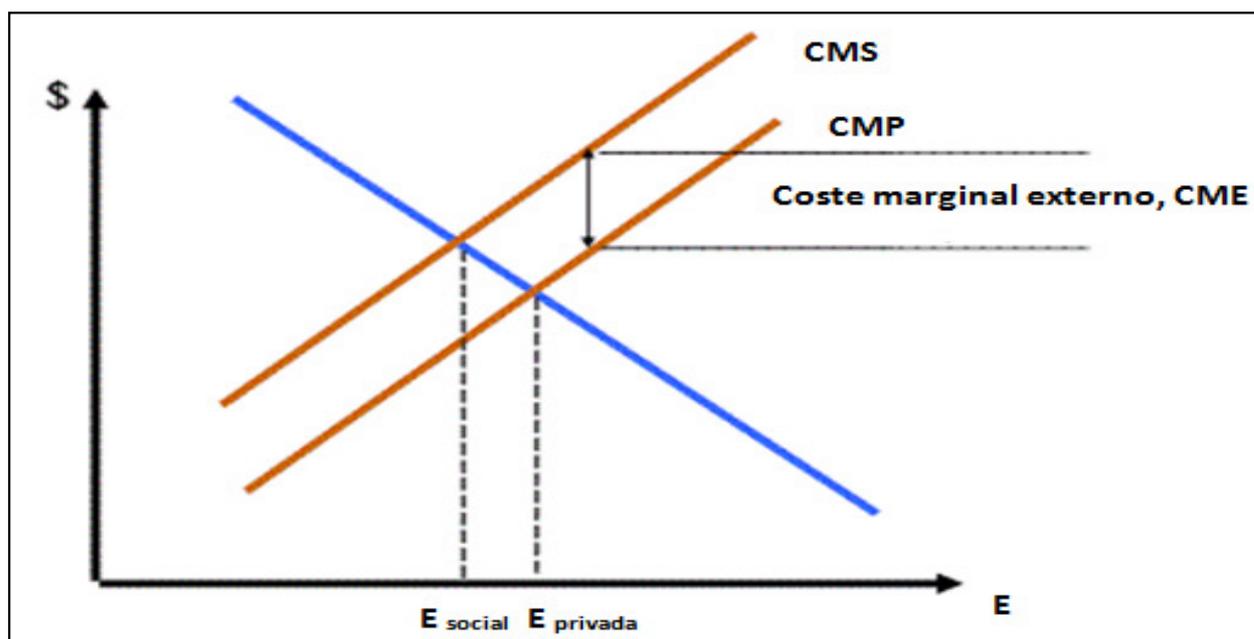


Figura 2.19. El costo marginal de la externalidad negativa.

Fuente: Napoleón. (2011).

El área por debajo de la curva de beneficios marginales privados representa el beneficio de los agricultores sin tener en cuenta el efecto negativo de la contaminación sobre el medio ambiente. El daño ambiental resultante de la actividad agraria está representado en la figura 2.20 por el área por debajo de la curva de daño marginal. En el caso que los derechos de emisiones están bien definidos, se alcanza el óptimo de emisiones E^* , donde el beneficio marginal privado es igual al daño marginal. Si las emisiones no están internalizadas, las emisiones aumentan desde E^* hasta \hat{E} , los daños aumentan en $A+B$ y los beneficios en A , con una pérdida de bienestar social igual a B .

El nivel eficiente de las emisiones está representado por el punto E^* que corresponde al nivel de contaminación que maximiza el bienestar de la sociedad. Este nivel óptimo tiene un precio sombra μ^* de la externalidad negativa. El precio sombra μ^* representa el coste de oportunidad para los agricultores y ganaderos de contaminar, es decir el precio que se alcanzará en un mercado de permisos de emisiones, o en un sistema de asignación de emisiones óptimo. Cuando las emisiones sean superiores al nivel eficiente E^* , el beneficio marginal disminuye hasta cero (\hat{E}) y el daño marginal aumenta, con una pérdida de bienestar social igual a B entre E^* y \hat{E} .

La determinación del nivel óptimo de las emisiones requiere la configuración de las funciones del beneficio marginal privado y de la función de daño marginal de las emisiones. En el caso de la contaminación difusa es extremadamente costosa determinar el daño medioambiental y su función. Por ello, no se busca alcanzar el nivel eficiente de emisiones, sino que se establece un umbral de contaminación aceptable. No se optimiza el nivel de contaminación, sino que buscan medidas costes eficientes para alcanzar el umbral. Por tanto, los bienes públicos como el medio ambiente requieren de

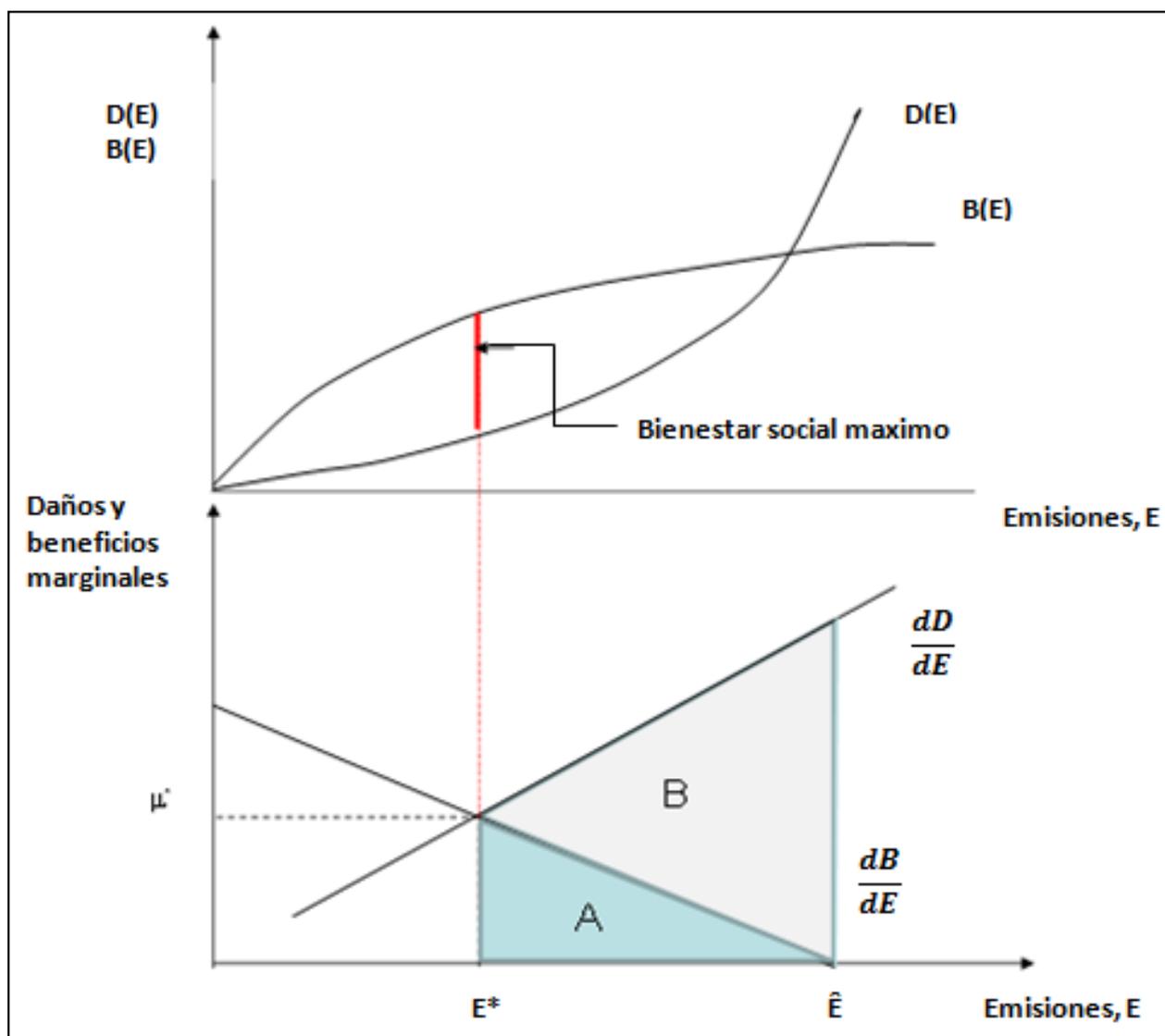


Figura 2.20. Funciones de daño y Beneficio marginal y total y el nivel eficiente de las emisiones.
Fuente: Perman (2011).

políticas de gestión pública y de instrumentos de control que garanticen su uso y sostenibilidad.

2.5.1. Los instrumentos de control de las emisiones GEI

El sector agrícola es una fuente importante de emisiones GEI que ya están dañando las actividades humanas y los ecosistemas. Por ello es necesario elaborar instrumentos de control de las emisiones de origen agrario que protegen el medio ambiente y los recursos naturales. Los instrumentos de control del medioambiente se clasifican en instrumentos de mando y control, instrumentos económicos, e instrumentos institucionales.

2.5.1.1. Los instrumentos de mando y control

Los instrumentos de mando y control es el método dominante en la mayoría de los países para reducir la contaminación (Perman, 2011). La autoridad pública especifica normas y regulaciones e impone obligaciones de comportamiento a los individuos o empresas. Estas reglas son el resultado de analizar la

distribución espacial de la carga de emisiones, y estableciendo un control directo sobre los responsables de las emisiones a partir de los indicadores como la cantidad de input utilizada, el producto final previsto, las técnicas aplicadas, o el nivel de contaminación. El problema de estos instrumentos es que requieren mucha información biofísica que es muy costosa de generar y de información privada sobre el comportamiento de los agricultores que el regulador no conoce.

2.5.1.2. Los instrumentos económicos

Los instrumentos económicos están basados en incentivos para los agentes contaminadores como precios o mercados, que estimulan la reducción de la contaminación en el origen y la protección del medio ambiente. Estos incentivos sirven para alcanzar el precio óptimo de la contaminación mediante impuestos sobre los inputs o sobre la carga de emisiones, mediante subvenciones, o con sistemas de comercio de los permisos de contaminación. Los instrumentos económicos crean un mercado que internaliza las externalidades medioambientales, de forma que las emisiones tienen un coste de oportunidad para los agricultores y las empresas.

Los impuestos y las subvenciones se utilizan para modificar la carga de emisiones contaminantes al cambiar las decisiones de producción y de utilización de insumos. El objetivo es incorporar en la toma de decisiones el efecto negativo de la externalidad sobre el medio ambiente. En los instrumentos económicos, el mecanismo de impuestos fue propuesto por Pigou (1932) y el mecanismo de mercados fue propuesto por Coase (1960). Un impuesto es un coste adicional para los contaminadores para alcanzar el nivel óptimo de emisiones, de forma que el impuesto es la diferencia entre el coste marginal social y el coste marginal privado. Las subvenciones son pagos del gobierno para que el responsable de la contaminación reduzca las emisiones (Figura 2.21).

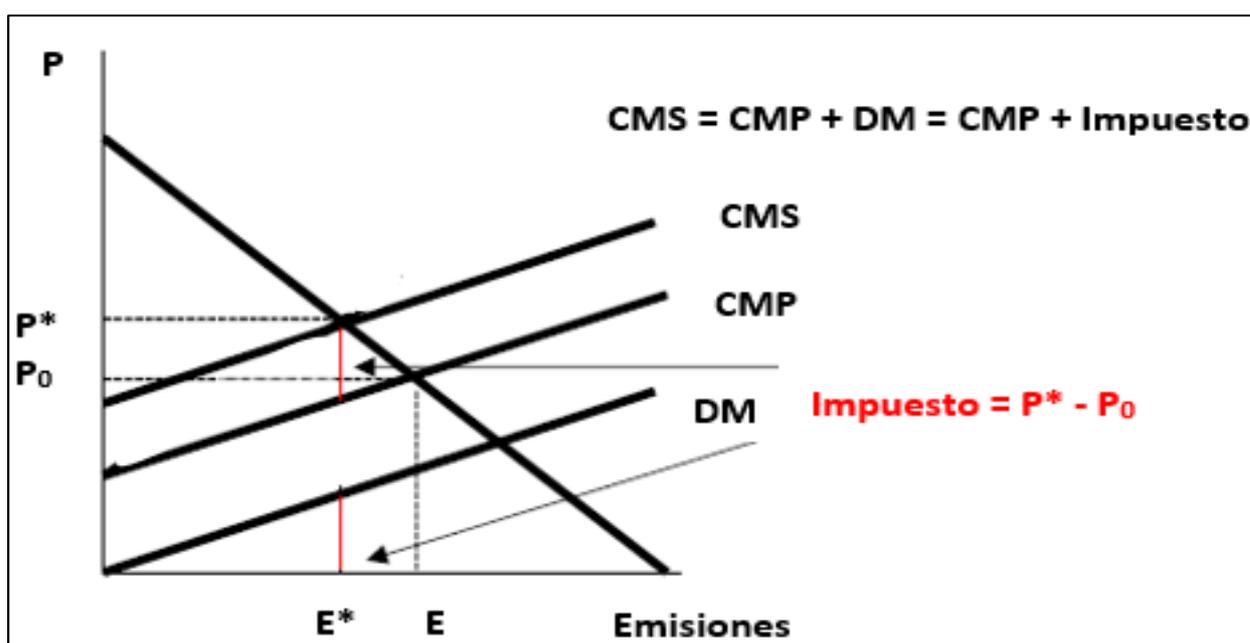


Figura 2.21. El daño marginal y el impuesto de contaminación.

El mercado de emisiones se basa en la privatización del derecho a contaminar mediante permisos de emisión, y la creación de un mercado de derechos de emisión. La cantidad de permisos de emisión la fija la autoridad pública para alcanzar niveles de contaminación aceptables. La carga de emisiones se asigna entre las diferentes fuentes individuales que pueden vender o comprar los permisos, por lo que los permisos son transferibles y negociables entre los propietarios de los derechos de emisión.

2.5.1.3. Los instrumentos institucionales

Los instrumentos institucionales incorporan las externalidades en la toma de decisiones mediante la cooperación de los agentes para lograr la acción colectiva de reducción de las emisiones. Los instrumentos institucionales se basan en las tradiciones de gestión colectiva de bienes comunales, el apoyo de la educación ambiental, el apoyo a los acuerdos entre los grupos de interés, y las normativas de responsabilidad civil.

2.5.2. El enfoque de cooperación entre los agentes contaminadores: teoría de juegos

La gestión sostenible del medio ambiente y de los recursos naturales requiere de la acción colectiva y la cooperación entre los grupos de interés (Albiac et al., 2008). La gestión de estos bienes públicos y comunales se caracteriza por la fuerte interrelación entre los agricultores y ganaderos en el uso de los recursos naturales, las externalidades asociadas con la producción y los conflictos resultantes sobre la sostenibilidad de los recursos y la protección de los ecosistemas.

La no cooperación entre los agentes que explotan un bien comunal se conoce como “la Tragedia de los Comunes”, aunque abundan contraejemplos de buena gestión colectiva de los bienes comunales (Hardin, 1968). La ausencia de acción colectiva frente al cambio climático es un ejemplo del “Dilema del prisionero” en el que las dificultades de establecer la cooperación perjudican a todos los agentes (Ostrom, 1990). La teoría de juego permite analizar muchos problemas de sobreexplotación y degradación de los recursos naturales que generan pérdidas de bienestar a las sociedades humanas. En la teoría de juegos, cada individuo maximiza su propio beneficio sin tener en cuenta los efectos sobre la sostenibilidad de los recursos naturales es por la falta de cooperación entre los agentes y grupos de interés. En el caso de las emisiones GEI de origen agrario, es necesario promover la cooperación entre los agricultores para poder controlar la contaminación difusa, ya que los instrumentos económicos solo pueden funcionar como mecanismos auxiliares.

La figura 2.22 muestra la reducción de contaminación, los beneficios y los costes marginales de reducción mediante la no cooperación y la cooperación entre los agentes. Los beneficios marginales y los costes marginales se representan mediante funciones lineales. MB_i es el beneficio marginal y MC_i es el coste marginal de reducción de la contaminación por cada agente i . El MB es el beneficio marginal total de la reducción de contaminación de todos los agentes que al ser un bien público es la suma vertical de los beneficios marginales individuales.

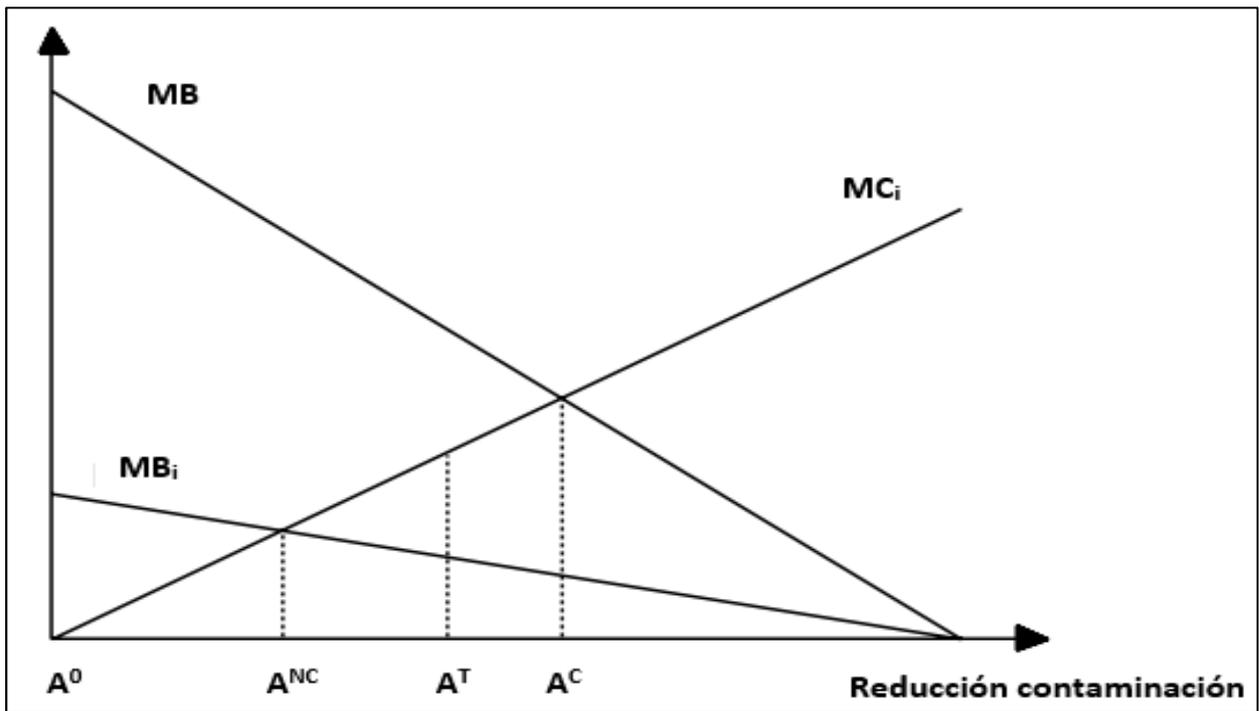


Figura 2.22. La reducción de contaminación bajo soluciones no cooperativas y cooperativas.
Fuente: Albiac et al. (2008).

$$MB = \sum_i MB_i \quad (5)$$

El punto A^0 representa la ausencia de esfuerzo de los agentes para reducir la contaminación. En el estado de no cooperación, el individuo i maximiza su beneficio marginal sin tener en cuenta su efecto negativo sobre el medio ambiente. El A^{NC} es el equilibrio de Nash dónde se igualan el beneficio marginal y el coste marginal individuales de reducción del agente i .

En el caso de cooperación entre los agentes, el equilibrio que maximiza el bienestar de la sociedad y la provisión de bienes públicos de manera eficiente está representado por el punto A^C , $MB = \sum_i MB_i = MC_i$. La definición de la función del beneficio marginal requiere información sobre los procesos biofísicas y los daños por contaminación a los ecosistemas. Cuando esta información no está disponible se establece un umbral de reducción razonable A^T donde la cooperación implica costes eficientes de reducción de contaminación para este umbral.

El enfoque de cooperación entre los agentes es una forma efectiva para lograr la conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente. Su aplicación requiere un sistema de control para detectar los comportamientos no cooperativos, y unos incentivos apropiados que promueven la cooperación de los agentes.



Capítulo 3

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

Capítulo 3

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

El sector agrario es un sector estratégico que tiene una importancia vital para todos los países y contribuye a la seguridad alimentaria global. Asimismo, las actividades agrícolas tienen un valor relevante en la economía de muchas regiones, ofrecen empleo y permiten el desarrollo y la conservación de las áreas rurales. Pero, el sector primario también genera emisiones significativas de GEI a la atmósfera, y otros impactos negativos sobre la sociedad y el medio ambiente que pueden deteriorar los recursos naturales. Por tanto, el primer objetivo de este trabajo es la descripción de las fuentes de emisiones, y la estimación del balance de emisiones GEI en Aragón a partir de la información biofísica y económica de las actividades de producción agrícola y ganadera.

Además, la agricultura ofrece oportunidades de bajo coste para reducir y mitigar las emisiones GEI en comparación con los costes de mitigación de otros sectores de la economía. En el trabajo se realiza un análisis del potencial de mitigación de los sectores de la agricultura, la ganadería y la silvicultura, y se evalúan distintas medidas de mitigación de secuestro de carbono en el suelo y de reducción de emisiones GEI. Para alcanzar este objetivo, se estima el coste-eficiencia de las medidas de mitigación del cambio climático, y se determina el potencial de reducción de cada medida de forma individual y del conjunto de medidas teniendo en cuenta sus interacciones.

En este trabajo, se utiliza el enfoque de la curva de coste de reducción marginal (MACC) que es una herramienta de evaluación ampliamente utilizada en el análisis de políticas de mitigación. Esta curva sirve para optimizar la reducción de emisiones en una amplia gama de actividades, y permite comparar el potencial de reducción y el coste de las distintas medidas de mitigación.

El coste marginal de reducción se puede calcular de diferentes maneras. Vermont y De Cara (2010) dividen el MACC en tres tipos de procedimientos para derivar las curvas. En este trabajo, se utiliza la metodología de costes ascendentes “Bottom up”, debido a la heterogeneidad regional del sector agrícola y la diversidad del uso de tierra. Esto implica que se deben elaborar medidas de mitigación adecuadas a los sistemas agrarios (Moran et al., 2010). La metodología de costes ascendentes se caracteriza por la recopilación de información sobre los costes y la reducción de emisiones de un conjunto de medidas de mitigación con el fin de calcular el coste por unidad de GEI reducida (MacLeod et al., 2015). Por ello, se elabora un diagrama de medidas de reducción ordenadas por sus costes ascendentes (€ por tCO₂e reducida).

La curva de coste de reducción marginal ilustra el coste-eficiencia de las medidas seleccionadas, mientras que el beneficio ambiental se estima mediante el coste social de carbono.

Este capítulo describe en primer lugar la metodología utilizada para estimar el balance de emisiones GEI en el sector agrícola en Aragón. A continuación, se explica el procedimiento utilizado para analizar el coste-eficiencia de las medidas de mitigación seleccionadas tanto de forma individual como para el conjunto de medidas con sus interacciones. Finalmente, se detallan los diferentes escenarios de mitigación que incorporan predicciones sobre la futura agricultura y sus emisiones.

3.1. La estimación del balance de emisiones de origen agrario

3.1.1. Metodología de estimación de las emisiones GEI

Las emisiones GEI que no son CO₂ consisten en emisiones de óxido nitroso y metano de diferentes fuentes: emisiones directas e indirectas del óxido nitroso de los fertilizantes, emisiones de metano de la fermentación entérica, y emisiones de óxido nitroso y metano del manejo de estiércol. La metodología aplicada en la estimación de estas emisiones GEI de origen agrario es el método Nivel 1 (Tier 1) del IPCC que consiste en multiplicar los factores de emisión por los datos específicos de cada región (superficie de los cultivos, cabezas de ganado, abonado, lixiviado, estiércoles) mediante la aplicación de la fórmula siguiente (IPCC, 2006):

$$\text{Emisión} = \text{FE} * \text{A}^8 \quad (6)$$

El IPCC (2006) señala que el factor de emisión es un valor específico para cada gas (CH₄, N₂O) y para cada categoría de fuente y representa la carga de emisión desde una fuente directamente a la atmósfera

En este trabajo, se aplica los métodos utilizados por la Agencia Europea del Medio Ambiente que se basan en la determinación de los factores de emisión por unidad de actividad y las ecuaciones físico-químicas del IPCC (1996).

La estimación de las emisiones GEI del sector agrario se hace mediante las siguientes ecuaciones (IPCC, 1996)

⁸ Emisión = Emisiones que no son CO₂, en toneladas equivalentes de CO₂.

A = Datos de la actividad relacionados con la fuente de emisión (puede ser superficie, número de animales o unidad de masa, según el tipo de fuente).

FE = Factor de emisión para cada gas y categoría de fuente específicos, toneladas de CO₂ equivalentes por unidad de A.

$$\checkmark \text{ Emisiones directas de } N_2O = \sum_{i=1}^n (N_i \cdot X_i \cdot FE_1 \cdot \left(\frac{44}{28}\right) \cdot PC_{N_2O}) / 1000^9 \quad (7)$$

$$\checkmark \text{ Emisiones indirectas de } N_2O = \sum_{i=1}^n (Lix_i \cdot X_i \cdot FE_2 \cdot \left(\frac{44}{28}\right) \cdot PC_{N_2O}) / 1000 \quad (8)$$

$$\checkmark \text{ Emisiones de } CH_4 \text{ de la fermentación entérica} = \sum_{j=1}^n (C_j \cdot FEA_j \cdot PC_{CH_4}) / 1000 \quad (9)$$

$$\checkmark \text{ Emisiones de } N_2O \text{ del manejo de estiércol} = \sum_{j,k}^n (C_j \cdot Nex_j \cdot FES_k \cdot \left(\frac{44}{28}\right) \cdot PC_{N_2O}) / 1000 \quad (10)$$

$$\checkmark \text{ Emisiones de } CH_4 \text{ del manejo de estiércol} = \sum_{j=1}^n (C_j \cdot FEM_j \cdot PC_{CH_4}) / 1000 \quad (11)$$

Las emisiones del óxido nitroso de los suelos agrícolas se derivan de los procesos de nitrificación y desnitrificación, como se ha señalado en el capítulo anterior. Estas emisiones tienen una relación directa con el aporte de nitrógeno a los suelos y se dividen en emisiones directas resultantes de la fertilización aplicada, e indirectas como consecuencia de las pérdidas de nitrógeno por lixiviación y escorrentía. Por ello, en las dos primeras ecuaciones **N** representa el aporte de nitrógeno por cultivo *i* en Kg de N/ha/año, **Lix** es la fracción lixiviada por cultivo *i* en Kg de N/ha/año y **X** representa la superficie cultivada en hectáreas de los distintos cultivos *i*.

Los valores de la fracción lixiviada es una información muy escasa en Aragón debido a la falta de trabajos que estiman las pérdidas de nitrógeno por tipo de cultivo y a la complejidad de los procesos que se desarrollan en el suelo. En este trabajo, el aporte de nitrógeno y la fracción lixiviada por cultivo se han determinado a partir de distintas fuentes entre las que destacan la publicación de Orús (2006) y Mema (2006), y la información proporcionada por la Unidad de Suelos y Riegos del CITA.

Para determinar los factores de emisión específicos para España se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica con el objeto de mejorar y aumentar el grado de precisión de los resultados. Los factores para las emisiones del óxido nitroso de los suelos agrícolas son 0,0125 Kg de N₂O-N por kilogramo de aporte de nitrógeno para las emisiones directas **FE1**, y 0,025 Kg de N₂O-N por kilogramo de lixiviado para las emisiones indirectas **FE2**. Estos factores no tienen en cuenta las condiciones agroclimáticas o las características fisicoquímicas del suelo, y son la relación entre el aporte de nitrógeno y las emisiones de N₂O.

Las emisiones de metano que provienen de la fermentación entérica de las especies ganaderas dependen principalmente del aparato digestivo y de la dieta alimentaria. Los rumiantes son las especies que generan metano entérico debido al proceso de digestión que se realiza en dos etapas. La primera etapa es el consumo y la segunda es la regurgitación y la remasticación del material semidigerido. En Aragón, las especies rumiantes más importantes que generan emisiones son el bovino

⁹ El coeficiente es la ratio de peso molecular entre el óxido nitroso (N₂O) y nitrógeno (N), y PC es el potencial de calentamiento de efecto invernadero. Para metano (CH₄) es igual a 23 y para óxido nitroso (N₂O) es igual a 296.

y el ovino.

Cuadro 3.1. Cantidad de nitrógeno excretado por tipo de animal.

Tipo de animal	N excretado (kg/animal/año)
Vacuno de leche	80
Vacuno de carne	45
Porcino	9
Ovino	9
Gallinas	0,4

Fuente: Orus (2006), Junta de Andalucía (2015), Pueyo (2006).

En la metodología del IPCC nivel 1, los factores de emisión para estimar el metano entérico son factores simplificados que no tienen en cuenta el tipo de animal de la especie ganadera (cebo, madre...), la tasa de crecimiento, o el tipo de la dieta. Se trata de un factor por defecto que se aplica al número de cabezas de la cabaña ganadera. En la tercera ecuación, **C** representa el número de cabezas de la especie animal *j* y **FEA** representa el factor de emisión de la especie animal *j* (Cuadro 2.2).

La gestión del estiércol sólido y líquido genera emisiones de óxido nitroso y de metano. La estimación de las emisiones del óxido nitroso del manejo del estiércol se basa en los valores de excreción de nitrógeno **Nex** por tipo de especie animal *j*, y estos valores son específicos para Aragón (Cuadro 3.1). Los factores de emisión varían según el tipo de sistema de manejo de estiércol *k* (**FES**), (cuadro 2.1). Siguiendo la información proporcionada por la Unidad de Producción Animal del CITA, el sistema de manejo de estiércol utilizado en Aragón es el Almacenaje de sólidos.

En cuanto a las emisiones de CH₄ procedentes del manejo del estiércol, se ha multiplicado el número de cabezas *C* de cada tipo de animal *j* por los factores de emisión correspondiente **FEM** (Cuadro 2.3).

3.1.2. Caracterización de la zona de estudio

La zona de estudio de este trabajo es la Comunidad Autónoma de Aragón que está situada en el noreste de la península ibérica en el Valle Medio del Ebro. Es una zona bien comunicada y caracterizada por su ubicación estratégica, a unos 300 km de las principales ciudades españolas (Madrid, Barcelona, Bilbao y Valencia) y conectada con el sur de Francia. Aragón limita al norte con Francia, al oeste con Navarra, la Rioja y Castilla León, al este con Cataluña y Valencia, y al sur con Castilla-La Mancha. La Comunidad Autónoma está dividida en las provincias Huesca, Teruel y Zaragoza, con 33 comarcas y 731 municipios (Figura 3.1). Tiene una superficie de 47.720 km² (IAEST, 2018a) cercana al 10% de la superficie del país (INE, 2017). La mayor parte de la superficie es de uso agrícola y forestal, con el 49% de zonas agrícolas y el 50% de zonas forestales con vegetación y especies abiertas. Las tierras de labor en secano dominan la zona agrícola y representan el 54% del total de la superficie agrícola, seguidas del regadío (14%),

mosaicos de cultivos (13%), y las tierras con vegetación natural (13%). Los cultivos leñosos representan el 4% de la superficie agrícola, y los cultivos más importantes son viñedos, almendros y olivares (IAEST, 2006).

La población de Aragón es de 1.308.750 habitantes en 2017, con una disminución de 3% respecto a 2010 (IAEST, 2017c), y con una fuerte concentración en Zaragoza de la mitad de la población (INE, 2017). La densidad de población es baja en las provincias de Huesca y Teruel por el desplazamiento de la población rural a la ciudad de Zaragoza que dispone de servicios, inversiones públicas y ofertas de empleo. La densidad de población es de 55,2 hab/km² en Zaragoza, 14,1 hab/km² en Huesca y 9,2 hab/km² en Teruel (IAEST, 2017c).

El clima es mediterráneo continental caracterizado por su variabilidad estacional, con inviernos fríos y veranos calurosos y secos. Se caracteriza además por vientos húmedos, escasas precipitaciones y elevada amplitud térmica. Estas características se derivan de su ubicación geográfica encerrada por los Pirineos en el norte, las montañas del Sistema Ibérico en el oeste y sur, y las montañas costeras de Cataluña en el este que impiden la influencia del mar. La estructura del relieve y las características orográficas del territorio producen una variada gama de ambientes climáticos, desde la aridez de las zonas centrales del Ebro caracterizadas por la escasez de precipitación hasta las zonas frías y húmedas de la alta montaña pirenaica caracterizadas por las nieves permanentes (Cuadrat, 2004). El clima de Aragón representa un rico mosaico climático que se caracteriza por su heterogeneidad. Esta variabilidad del clima afecta al sector primario y condiciona las actividades agrícolas, los recursos naturales (agua, suelo...), y la calidad del paisaje.

Los periodos de calor reducen las producciones agrícolas. Por ejemplo, las temperaturas del año agrícola 2016-2017 en Aragón fueron superiores a los valores normales (14,3 °C) debido a las temperaturas cálidas y secas durante los meses abril, mayo y septiembre, mientras que las precipitaciones de 524 litros han sido normales. El aumento de temperatura ha provocado pérdidas en la producción de cereales de invierno en secano en zonas de Teruel. En general, los rendimientos cerealistas en secano se sitúan en unos 2.000 kg/ha en el periodo 1982-2016. Las temperaturas también reducen la producción de alfalfa en secano y el rendimiento de la vid con caídas de producción en las zonas de denominación de origen de Borja y Cariñena. Las sequías del pasado verano y otoño han reducido la producción de aceitunas en cantidad y calidad (Gobierno Aragón, 2017).

Los rendimientos de los cultivos en regadío han tenido buenas cosechas en 2017 con incrementos en las producciones de cereales, cultivos forrajeros, arroz, maíz y otros cultivos industriales (Gobierno Aragón, 2017).

En cuanto a la ganadería, se observa un fuerte crecimiento del censo y la producción de porcino en los últimos años. Las plazas de cebo y de reproducción han aumentado de 25% y 8% desde 2014. Actualmente, la producción de porcino representa el 62% de la producción ganadera y el 36,4% de la producción agraria. Asimismo, las plazas de bovino se han incrementado hasta 416.210 cabezas en 2017, mientras que el sector ovino está en crisis, con pérdidas del 26% de cabezas desde 2008 (Gobierno Aragón, 2017).

Las zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos representan el 50% de la superficie de Aragón, y tiene gran importancia en el territorio. La superficie forestal está localizada en Huesca (37%), Teruel (37%) y Zaragoza (26%). Las especies forestales más importantes son matorrales esclerófilos (30%), bosques de coníferas (24%), matorral boscoso de transición (17%) y bosques de frondosas (9%) (IAEST, 2006).

El sector agrícola, ganadero y silvícola contribuye al valor añadido bruto (VAB) de 1.800 millones de euros en 2016 que representa el 5,6% del total del VAB en Aragón y ofrece empleo a 36.421 personas. Estas magnitudes macroeconómicas de VAB y empleo han disminuido un 37% y un 7%, respectivamente, respecto al año 2010 (IAEST, 2018b).

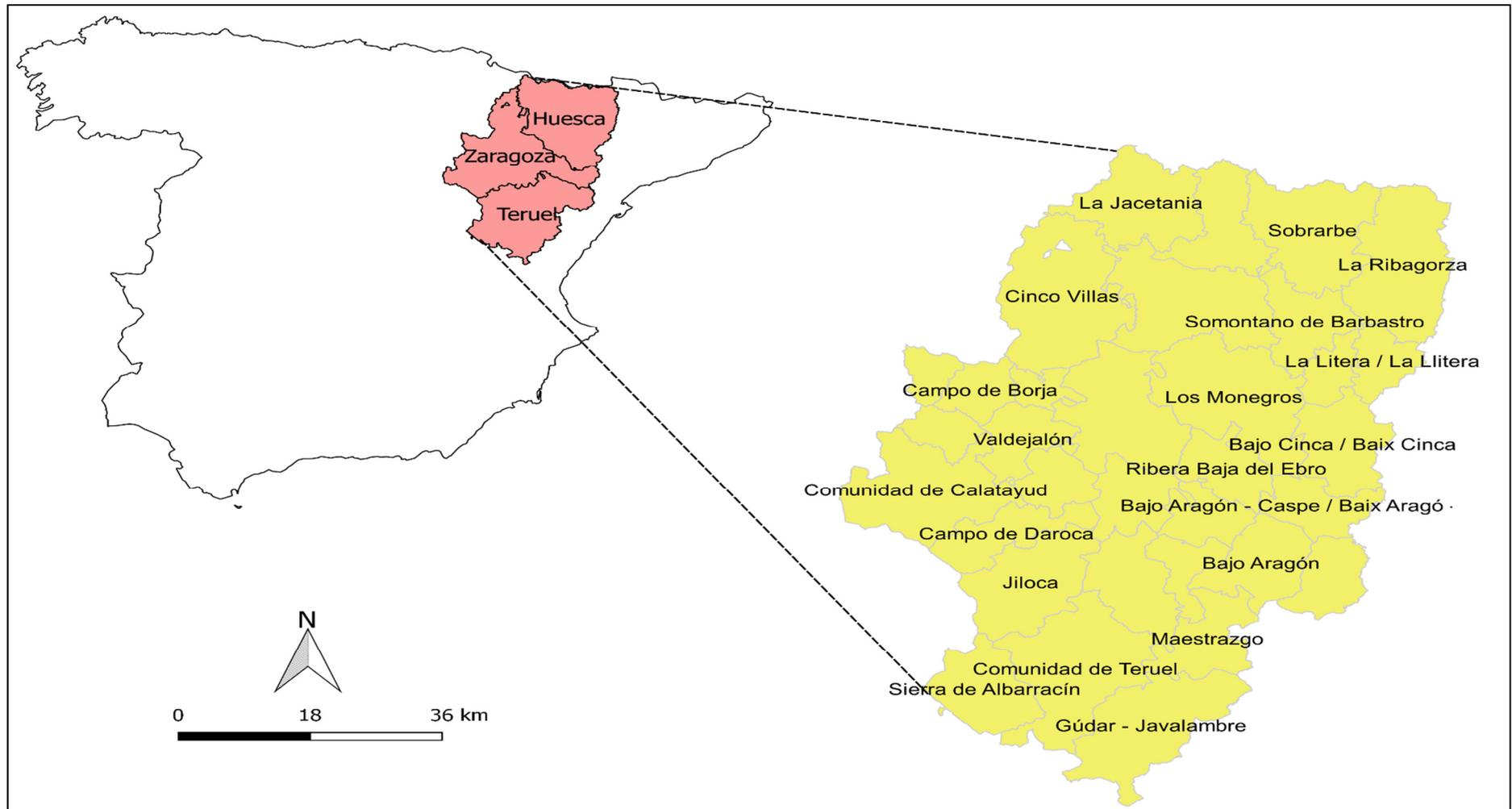


Figura 3 1. Mapa de las comarcas de Aragón.

3.1.2.1. Los datos específicos de Aragón para el cálculo de las emisiones

La superficie de los cultivos

La superficie de los cultivos se ha tomado de las estadísticas 1-T del Departamento de Agricultura del Gobierno de Aragón del año 2014 (Gobierno de Aragón, 2014a). Esta información se ha agregada por municipios, comarcas y tipo de cultivo. En el trabajo, se han seleccionado los cultivos más importantes en la región en términos de superficie ocupada, rendimiento, y renta disponible. La superficie de los cultivos seleccionados ocupa 1.036.000 ha, de las que un 66% están en secano y un 34% en regadío. Por grupos de cultivos, los herbáceos ocupan el 83% de la superficie y los leñosos el 17% (Cuadro 6.1).

Los cultivos herbáceos son importantes en Monegros (121.922 ha), Cinco Villas (110.856 ha), Hoya de Huesca (94.843 ha) y Zaragoza (50.386 ha), mientras que los cultivos leñosos se concentran en Bajo Aragón (20.245 ha), Matarraña (19.336 ha) y Campo de Cariñena (15.722 ha). En secano, los cultivos principales son la cebada (55%) y el trigo (27%) mientras que en regadío se cultiva sobre todo cebada (27%), maíz (22%) y alfalfa (20%), (Figura 3.2). En regadío, el sistema de riego por inundación es el más utilizado (47% de la superficie), seguido por la aspersión en cultivos herbáceos (38%) y el goteo en leñosos (15%) (MAPAMA, 2017d)¹⁰.

Manejo de los cultivos

El aporte de nitrógeno a los cultivos y la fracción lixiviada se han determinado a partir de la publicación de Orús (2006) y Mema (2006). La información sobre los rendimientos de los cultivos en secano y regadío se ha tomado de las publicaciones del Ministerio de Agricultura (serie 2009-2014) sobre resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas en Aragón, junto con las publicaciones de estadísticas agrarias de Aragón. Para mejorar la exactitud de los valores, se ha utilizado la información empírica proporcionada por la Unidad de Suelos y Riegos del CITA. Los cuadros 3.3 y 3.4 muestran el manejo de los cultivos en secano y regadío y los datos de superficie, rendimiento, margen neto, uso del agua, sistema de riego, aporte de nitrógeno y fracción lixiviada por tipo de cultivo.

El olivar y la cebada en cultivos de secano, y el maíz en cultivos de regadío son los que necesitan mayor cantidad de abonado nitrogenado, y por tanto los cultivos con mayores emisiones de óxido nítrico.

¹⁰ La información de la distribución de la superficie según sistema de riego del MAPAMA. (2017d) es para todo Aragón, pero no está desagregada por municipios. La información que se utiliza para los cálculos de emisiones a nivel municipal es del Censo Agrario del año 2009.

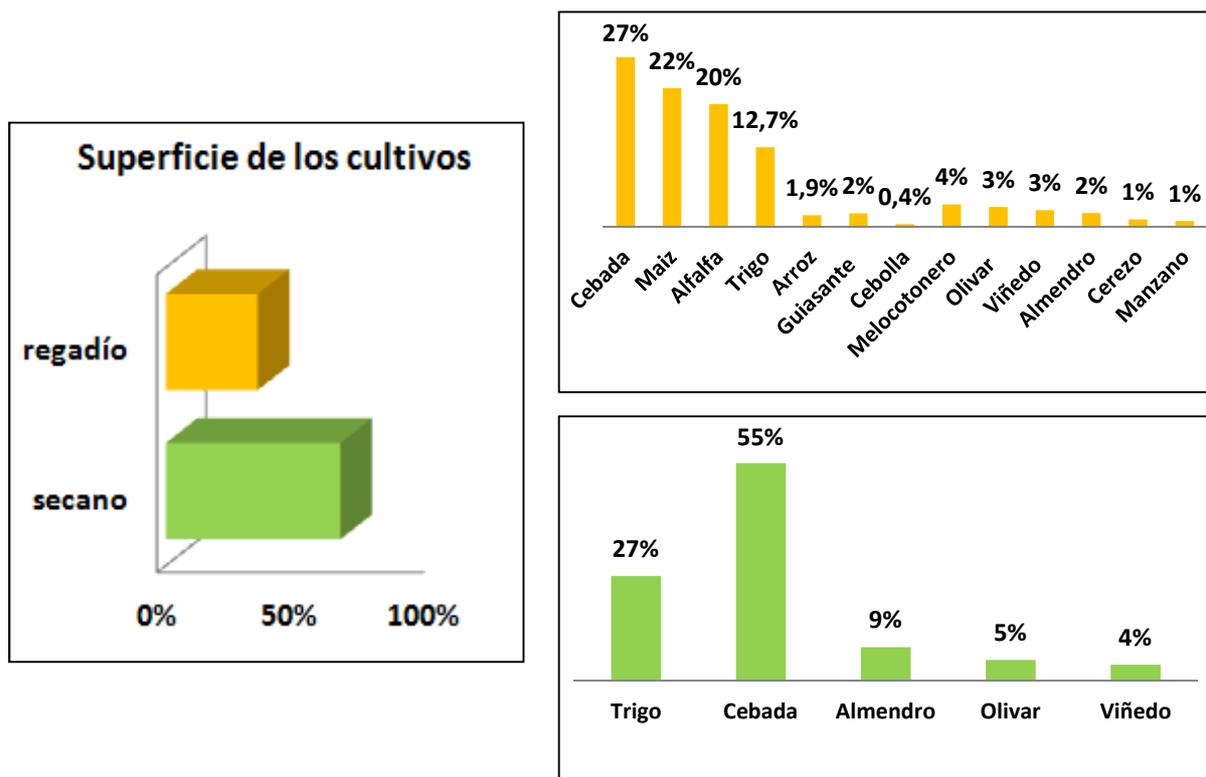


Figura 3.2. Distribución de la superficie de los cultivos estudiados.
Fuente: Gobierno de Aragón (2014a).

En cuanto a la rentabilidad, el viñedo y la cebada son los cultivos más rentables en secano. En regadío, los sistemas de riego por aspersión y goteo son más eficientes en el uso de agua y también más rentables que el riego por inundación. La alfalfa y el maíz son los herbáceos más rentables, y el manzano, cerezo, melocotonero y viñedo son los leñosos que tienen mayor rentabilidad.

La información económica utilizada se ha tomado de las publicaciones del Ministerio de Agricultura (serie 2009-2014) sobre resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas en Aragón, y de los estudios de costes y rentas de las explotaciones agrarias (ECREA). El margen neto de los cultivos es la diferencia entre los ingresos y los costes. La cebolla, el manzano y el cerezo son cultivos con elevado margen neto pero poca superficie. La cebada y el trigo ocupan la mayor parte de la superficie, pero tienen un margen neto pequeño.

El porcino y el vacuno de leche tienen elevado margen neto por animal de 320 y 275 €, respectivamente (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Margen neto por tipo de animal (€/animal).

Animal	Margen neto (€/animal)
Porcino	320
Ovino	3
Vacuno de leche	275
Vacuno de carne	60
Broiller (carne)	0,3
Gallinas (huevo)	1,44

Fuente: MAPAMA (2012, 2013, 2014).

Las necesidades de agua de los cultivos se han determinado con información de la Unidad de Suelos y Riegos del CITA. Las comunidades de regantes son responsables de la gestión del agua, la organización del riego entre los agricultores, y el control del consumo y cumplimiento de las normas.

Los cultivos que necesitan mayor cantidad de agua son arroz (14000 m³/ha), maíz y alfalfa (10000 m³/ha), manzano (8000 m³/ha), cebolla (7500 m³/ha) y melocotón (7000 m³/ha) en sistemas de riego por inundación. En riego por aspersión y localizado, el uso del agua de los cultivos es menor por la mayor eficiencia en parcela de la aplicación del agua. Además, estos sistemas de riego más avanzados permiten una aplicación óptima del abonado.

Cuadro 3.3. Manejo de los cultivos en secano.

Cultivos	Superficie(ha)	Margen neto(euro/ha)	Rendimiento (Tm/ha)	Abonado nitrógeno (kg/ha)	Lixiviado de N(Kg/ha)
Trigo	181.251	250	1,4	45	5
Cebada	376.560	150	2,8	77	8
Almendro	57.724	400	0,4	45	5
Olivar	35.629	300	0,5	60	6
Viñedo	27.592	600	4,5	45	5

Cuadro 3.4. Manejo de los cultivos en regadío¹¹.

Cultivos	Margen neto (euro/ha)	Superficie (ha)	Superficie (ha)			Rendimiento (Tm/ha)			Uso del agua (m ³ /ha)			Abonado del Nitrógeno (kg/ha)			Lixiviado de N (kg/ha)		
			Inun	Asp	Gt	Inun	Asp	Gt	Inun	Asp	Gt	Inun	Asp	Gt	Inun	Asp	Gt
Cebada	300	96.815	73.552	23.263		3,8	4,6		3.750	3.000		200	150		38	25	
Maíz	1.400	79.070	22.169	56.901		11	12,5		10.000	8.000		450	350		200	120	
Alfalfa	850	70.043	36.874	33.169		15	16,5		10.000	8.500		85	56		32	21	
Trigo	300	45.362	33.559	11.803		4,2	4,7		4.600	3.700		200	180		48	22	
Arroz	800	6.735	6.735			5			14.000			200			50		
Guisante	600	7.763	4.278		3.485	8,4		8,7	4.500		3.000	90		60	16		10,5
Cebolla	5.000	1.570	722		848	35		37	7.500		5.000	200		140	33,5		23,5
			Inun	Asp	Gt	Inun	Asp	Gt	Inun	Asp	Gt	Inun	Asp	Gt	Inun	Asp	Gt
Melocotón	2.600	12.833	6.148		6.685	20,5		22,5	7.000		4.667	200		150	60		45
Olivar	600	11.423	8.792		2.631	1,9		2,3	4.000		2.600	120		100	36		30
Viñedo	2.600	9.684	4.680		5.004	7,9		8,9	4.500		2.000	120		100	36		30
Almendro	1.600	7.940	5.802		2.138	1,3		1,5	3.500		2.300	100		80	30		24
Cerezo	2.900	4.326	2.131		2.195	4,6		4,8	6.870		4.580	100		80	30		24
Manzano	3.100	3.333	1.402		1.931	25		30	8.000		5.333	150		130	45		39

¹¹ Inun: Inundación
 Asp: Aspersión
 Gt: Goteo

La cabaña ganadera

La información del número de cabezas ganaderas se ha determinado a partir del censo ganadero 2014, del Anuario Estadístico Agrario de Aragón 2013-2014 (Gobierno de Aragón, 2014b) y del Anuario Estadístico del MAPAMA de 2014 (MAPAMA, 2014b). Estos datos se han agregado por municipios, por comarcas y por especie de animal (Cuadro 6.3).

En este trabajo se han seleccionado las especies más importantes en Aragón, que son porcino, ovino, bovino y gallinas. El número de gallinas corresponden a las granjas de cría y de producción de carne y de huevo y a las granjas de multiplicación. El censo de porcino animales de porcino alcanza los 6,3 millones en Aragón. El sector porcino es un sector de gran importancia económica y social, y se localiza en Monegros (1.092.000 cabezas), Cinco Villas (882.000 cabezas), La Litera (533.000 cabezas) y Bajo Cinca (449.000 cabezas). Mientras que la producción ovina ha experimentado una fuerte crisis y el censo ha caído a 1.800.000 cabezas en 2014.

El bovino no es muy importante en la región, con un número reducido de cabezas de vacuno de leche (14.686 cabezas) y de cabezas de vacuno de carne (306.182 cabezas). El vacuno de carne se localiza en La Litera (69.992 cabezas), Bajo Cinca (25.029 cabezas), Monegros (18.885 cabezas) y Sobrarbe (15.333 cabezas).

La fijación de carbono

Las especies forestales se han clasificado en 8 estratos y la superficie de cada estrato se ha agregada por municipio, con información proporcionada por la Unidad de Recursos Forestales del CITA. Los estratos que ocupan una mayor superficie forestal en Aragón son los Pinares (31%), Encinares Quejigares (22%) y Arbolado claro (21%).

La fijación de carbono es un proceso importante para combatir al cambio climático. Las plantas absorben la energía solar y el CO₂ atmosférico para producir biomasa mediante la fotosíntesis. La tasa de fijación de carbono depende de la especie, de la zona, de las condiciones climáticas, y del manejo aplicado. El carbono se fija en la parte radical y en la parte aérea de la planta. En este trabajo, la tasa de fijación de carbono radical y área en cada municipio depende del tipo de estrato. El cuadro 3.5 muestra la fijación de carbono bajo el manejo que está realizado en la región por estrato y por comarca. La cantidad de CO₂e almacenada por la biomasa aérea representa un 71%, mientras que la parte radical fija un 29% del carbono fijado.

Las especies forestales en Aragón capturan cerca de 3 MtCO₂e, que se concentran en Sobrarbe (320.000 tCO₂e), Ribagorza (305.000 tCO₂e), Jacetania (285.000 tCO₂e), Guadar (277.000 tCO₂e) y Cinco Villas (154.000 tCO₂e). Las comarcas Ribera Alta del Ebro, Cinca Medio, Campo de Belchite y Bajo

Martín tienen una superficie forestal muy reducida con una baja fijación de carbono (1%).

Las especies que fijan mayor cantidad de carbono son pinares (38%), seguidos de Encinares Quejigares (19%). Los pinares de calidad ocupan solamente el 17% de la superficie y fijan el 19% del total de carbono fijado, mientras el Arbolado claro ocupa el 21% de la superficie y fija solamente un 8%.

El beneficio medioambiental de la fijación de carbono de los bosques en Aragón alcanza los 116 millones de Euro al año, utilizando la estimación del coste social de carbono de 40 €/tCO₂e de la OCDE (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.5. Fijación de carbono en Aragón (tCO₂e, 2017).

Comarcas	Arbolado claro	Coníferas de Alta montaña	Encinares Quejigares	Hayedos	Mixtos	Pinares	Pinares Calidad	Sabinares	Total
Alto Gállego	6.657	19.839	13.432	9.619	24.325	50.812	70.816	128	195.627
Andorra Sierra de Arcos	2.684		485			17.206	209	1.363	21.947
Aranda	2.663		12.176			11.508			26.347
Bajo Aragón	15.075		11.272			59.084	3.993	2.615	92.039
Bajo Aragón Caspe	14.124		712			28.977			43.813
Bajo Cinca	7.235		642			33.997		171	42.045
Bajo Martín	2.844					10.820		438	14.102
Campo de Belchite	1.779		775			7.113			9.667
Campo de Borja	2.365		5.500			5.045			12.910
Campo de Cariñena	1.592		7.994			9.478			19.064
Campo de Daroca	7.422		13.152			17.873			38.447
Cinca Medio	982		2.378			2.184		1.622	7.165
Cinco Villas	18.588		38.117			97.126			153.831
Comunidad de Calatayud	13.993		33.600			88.092			135.685
Comunidad de Teruel	10.905		12.555			42.995	20.808	11.629	98.893
Cuencas Mineras	8.899		12.174			38.338	10.307	3.033	72.751
Gúdar Javalambre	16.750		48.102			117.200	71.935	23.215	277.201
Hoya de Huesca	5.738	650	52.521	291	15.057	45.423	23.148	9.217	152.044
Jiloca	10.280		25.123			22.456	11.569	2.654	72.083
La Jacetania	3.547	28.186	30.312	23.610	55.193	64.272	79.382	256	284.758
La Litera	2.301		16.596			10.052		4.353	33.301
La Ribagorza	9.387	55.342	77.094	7.287	40.688	54.306	57.169	4.054	305.327
Los Monegros	6.475		5.390		215	24.719		2.518	39.316
Maestrazgo	7.866		18.555			30.037	30.362	1.685	88.504
Matarraña	5.426		7.549			44.869	2.343	424	60.611
Ribera Alta del Ebro	765					833			1.599
Ribera Baja del Ebro	5.069		1.487			9.275			15.831
Sierra de Albarracín	12.169		7.704			53.748	46.879	16.876	137.376
Sobrarbe	7.700	78.979	42.048	17.781	37.377	61.593	71.518	3.115	320.109
Somontano de Barbastro	6.473		31.740		783	15.701	3.009	10.412	68.117
Tarazona y El Moncayo	1.937		5.607			11.272			18.816
Valdejalón	1.686		2.448			8.035			12.169
Zaragoza	11.225		1.224			23.662			36.110
Total	232.600	182.995	538.461	58.588	173.637	1.118.101	503.448	99.777	2.907.609

Cuadro 3.6. Valor medioambiental por la fijación de carbono (€).

Comarcas	Fijación de carbono (tCO ₂ e)	Valor medioambiental (€)
Alto Gállego	195.627	7.825.075
Andorra Sierra de Arcos	2.1947	877.888
Aranda	2.6347	1.053.875
Bajo Aragón	92.039	3.681.558
Bajo Aragón Caspe	43.813	1.752.512
Bajo Cinca	42.045	1.681.787
Bajo Martín	14.102	564.064
Campo de Belchite	9.667	386.686
Campo de Borja	12.910	516.410
Campo de Cariñena	19.064	762.570
Campo de Daroca	38.447	1.537.871
Cinca Medio	7.165	286.604
Cinco Villas	153.831	6.153.256
Comunidad de Calatayud	135.685	5.427.418
Comunidad de Teruel	98.893	3.955.706
Cuencas Mineras	72.751	2.910.053
Gúdar Javalambre	277.201	11.088.032
Hoya de Huesca	152.044	6.081.780
Jiloca	72.083	2.883.313
La Jacetania	284.758	11.390.325
La Litera	33.301	1.332.056
La Ribagorza	305.327	12.213.078
Los Monegros	39.316	1.572.650
Maestrazgo	88.504	3.540.179
Matarraña	60.611	2.424.458
Ribera Alta del Ebro	1.599	63.959
Ribera Baja del Ebro	15.831	633.251
Sierra de Albarracín	137.376	5.495.058
Sobrarbe	320.109	12.804.378
Somontano de Barbastro	68.117	2.724.680
Tarazona y El Moncayo	18.816	752.643
Valdejalón	12.169	486.762
Zaragoza	36.110	1.444.416
Total	2.907.609	116.304.351

3.2. La estimación del potencial de mitigación en Aragón

3.2.1. Metodología empleada para la estimación del potencial de reducción de medidas de mitigación

Una vez estimado el balance de emisiones GEI de la región, a continuación se evalúa el coste-eficiencia de las medidas de mitigación de las emisiones del sector primario, y se determina el potencial de reducción individual de cada medida, y del conjunto de las medidas teniendo en cuenta sus interacciones.

La selección de las medidas de mitigación se basa principalmente en la información técnica y en los procesos y procedimientos que se pueden desarrollar en el suelo para incrementar el secuestro de carbono en el suelo y reducir las emisiones directas e indirectas de óxido nítrico. También se plantean medidas que permitan reducir las emisiones de la fermentación entérica, y de las emisiones del manejo de estiércol de la ganadería. Asimismo, se han seleccionado medidas para aumentar la fijación de carbono en las especies forestales. Por otra parte, se han llevado a cabo consultas con expertos y una revisión bibliográfica para determinar las medidas que se adoptan con mayor frecuencia en Aragón y en las regiones mediterráneas. Para determinar el grado de aplicación de cada medida en Aragón se ha utilizado la información y los datos experimentales proporcionados por la Unidad de Suelos y Riegos del CITA, por el CSIC, por la Unidad de la Producción Animal, y por la Unidad de Recursos Forestales del CITA.

Las medidas consideradas en el trabajo son las siguientes: en el ámbito agrícola ajustar las cantidades de fertilizantes nitrogenados, cultivos cubiertos, modernización del sistema de riego, inhibidores de nitrificación (DMPP), sustitución de la fertilización mineral por fertilización orgánica, reducción del laboreo, y rotación de cultivos con leguminosas. En el ámbito ganadero reducción de la cantidad de proteína en la dieta de porcino, adición de lípidos en la dieta de los rumiantes, y plantas de tratamientos de estiércol. Por último, en el sector forestal se plantea el cambio de la gestión de los bosques orientada a la fijación de carbono.

El análisis se centra en las medidas que sean económicamente eficientes para reducir las emisiones y que permiten mejorar la renta de los agricultores y el bienestar social. Para ello, se ha recopilado la información local y regional sobre los costes y la efectividad de las medidas de mitigación seleccionadas. Los costes representan el coste de inversión y operación de la implementación de cada medida de mitigación y su impacto en las ganancias de los agricultores. La efectividad mide el potencial de cada medida para reducir las emisiones GEI.

Posteriormente, se calcula la relación coste-eficiencia de cada medida de mitigación (€/tCO₂e disminuida) y se clasifica las distintas medidas en función de su coste-eficiencia utilizando la curva de coste marginal de reducción (Marginal Abatement Cost Curve, MACC).

Por último, se realiza un análisis coste-beneficio utilizando los resultados del MACC y el coste social de los daños de las emisiones GEI a partir de la estimación de 40€/tCO₂e del coste social del carbono de la OCDE (Smith y Braathen, 2015). El análisis coste-beneficio permite identificar la combinación eficiente de las medidas que pueden mitigar las emisiones GEI agrícolas sin dañar los beneficios que generan para la sociedad las actividades agrícolas y ganaderas en Aragón (Pearce et al., 2006; Perni y Martínez-Paz, 2013).

Tras del análisis del potencial de mitigación de GEI de cada medida de forma individual, se evalúa el potencial de mitigación cuando las medidas se toman conjuntamente y existen interacciones entre ellas. La determinación de las interacciones es un proceso complejo y hay poca información técnica sobre los efectos de las medidas cuando se toman simultáneamente. En este trabajo, la metodología empleada para esta parte es la ordenación de las diferentes medidas utilizando los resultados del análisis coste-beneficio de cada medida, una evaluación cualitativa basada en la importancia de la medida en la mitigación del cambio climático, el grado de aplicabilidad de las medidas en Aragón, el coste-eficiencia de las medidas, y el potencial de beneficio de las medidas para los agricultores.

El cálculo del potencial de mitigación cuando las medidas se examinan conjuntamente se realiza utilizando las mismas herramientas y metodologías utilizadas con las medidas individuales. La diferencia es que ahora para cada medida se tiene en cuenta la reducción de las otras medidas según el orden de medidas planteado. El objetivo de estas dos partes es comparar el potencial de reducción de las medidas sin tener en cuenta las interacciones entre medidas, o teniéndolas en cuenta.

3.2.2. Descripción de las medidas seleccionadas

Las medidas de mitigación planteadas se dividen en medidas para cultivos, para ganadería y forestales. El Cuadro 3.8 presenta un resumen de los costes y efectos de cada medida.

Medidas para los cultivos

Ajuste de la fertilización nitrogenada

Esta medida plantea un cambio en el aporte de fertilizantes nitrogenados. El objetivo de esta medida es la optimización de la cantidad de nitrógeno aplicada en los sistemas de cultivos según la necesidad de cada cultivo sin afectar el rendimiento. Un uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados puede reducir las emisiones directas e indirectas del óxido nitroso de los cultivos. Un mejor manejo puede reducir igualmente otras emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la fabricación de

fertilizantes sintéticos (Sanz-Cobena et al., 2017).

La necesidad de nitrógeno de cada cultivo se determina a partir de la información proporcionada por la Unidad de Suelos y Riegos del CITA y por las informaciones técnicas del Gobierno Aragón (Orús, 2006), que corresponden a estimaciones de la necesidad de los cultivos de la fertilización orgánica e inorgánica. Estas estimaciones se basan en el que la cantidad de la fertilización no supera en un 20% las extracciones de nitrógeno de cada cultivo. El cuadro 3.7 muestra la necesidad de nitrógeno de cada cultivo.

El precio del nitrógeno considerado en este trabajo es 1,037 €/kg de N (Kahil, 2011). Este precio se obtiene mediante la regresión de los precios de catorce fertilizantes y las proporciones de nitrógeno activo, fósforo y potasio que contienen. La ecuación de regresión estimada es: $P = 1,037 * N + 1,180 * P_2O_5 + 0,506 * K_2O$.

La reducción del aporte de nitrógeno permite reducir el coste de los fertilizantes, aumentar el margen neto de los agricultores, y reducir las emisiones directas e indirectas de óxido nítrico.

Cuadro 3.7. La necesidad de nitrógeno por cada cultivo (kg/ha).

Cultivos	Necesidades de N(kg/ha)			
	Inundación	Aspersión	Goteo	Secano
Cebada	116	87		45
Maíz	395	304		
Alfalfa	85	55		
Trigo	144	130		32,5
Arroz	132			
Guisante	64		43	
Cebolla	186		130	
Melocotonero	90		68	
Olivar	38		31	19
Viñedo	71		60	27
Almendro	8		7	4
Cerezo	24		19	
Manzano	83		71	

Sustitución de la fertilización mineral por orgánica (estiércol)

Esta medida corresponde al aumento de la fertilización orgánica de nitrógeno desde el 27% que es la media española (Albiac et al., 2017) hasta el 60%. La utilización del estiércol como fertilizante de los cultivos proporciona un beneficio ecológico al depositar nutrientes como nitrógeno y fósforo en el suelo. El nitrógeno del estiércol se encuentra principalmente en forma de amoníaco y las plantas lo

usan como nutriente (Miner et al., 2000). Además, la fracción líquida del estiércol ayuda a disminuir las pérdidas de nitrógeno, carbono y azufre en sus formas gaseosas, en el suelo (Capulin et al., 2001), por lo tanto, aumenta la fijación de carbono en el suelo y mejora su retorno (Sánchez et al., 2014). Esta sustitución reduce la cantidad de nitrógeno mineral aplicada, y por tanto reduce la lixiviación de nitratos y las emisiones del óxido nitroso N_2O . En Aragón, según la cantidad de estiércol estimada, se puede reducir la fertilización mineral hasta un 60%.

El cuadro 6.5 representa la cantidad de nitrógeno excretada por comarca y por tipo de animal. Estos valores se determinan a partir de la cantidad de nitrógeno excretada por animal y año (Cuadro 3.1). En Aragón, la cantidad de nitrógeno excretado (Nex) alcanza las 99.000 tN con una concentración elevada en las comarcas de Monegros (12.000 tN), La Litera (9.000 tN), Cinco Villas (9.600 tN) y Bajo Cinca (6.000 tN). La cabaña de porcino es importante en la región y está presente en todas las comarcas. La cantidad de nitrógeno excretado por el ganado porcino representa el 57% del total de Nex.

Un aspecto importante a analizar es la localización espacial de las parcelas agrícolas y de las explotaciones ganaderas para determinar la distancia entre ellas y poder estimar el coste de transporte y de aplicación de los estiércoles. En este trabajo se utiliza un coste de 3,7 €/m³ de estiércoles para una distancia de 10 km (Daudén et al., 2011), es decir se utiliza un coste de aplicación del estiércol de 0,74 €/kg N. El coste de aplicación de estiércol incluye las operaciones de carga, transporte, descarga y distribución, y de la utilización de equipo especializado.

Esta medida permite reducir las emisiones del óxido nitroso, a la vez que disminuye el coste de fertilización en - 0.297€ por kilogramo de N aplicado.

Modernización del sistema de riego

La modernización del sistema de riego consiste en sustituir el sistema de riego por inundación por los sistemas de riego por aspersión y riego localizado. Esta medida aumenta la eficiencia en el uso del agua de los cultivos y reduce la cantidad de nitrógeno aplicada, y por lo tanto disminuye la contaminación de nitrógeno a la atmósfera y a los cursos de agua. Un regadío más eficiente puede aumentar el rendimiento de los cultivos y los residuos de los cultivos que mejoran el secuestro de carbono (Lal, 2004). Según García-Marco et al. (2014), la humedad del suelo es un factor importante para controlar las emisiones de óxido nitroso. Por lo tanto, la modernización de los sistemas de riego tiene un alto potencial de mitigación de óxido nitroso (Sánchez-Martin et al., 2010).

El coste de modernización utilizado es 385€/ha/año (Guardia, 2010), que es la amortización neta anual durante el ciclo vital de las inversiones. Este coste incluye la modernización de la red general y

el coste de instalación del sistema de riego en parcela.

Inhibidores de nitrificación

Esta medida corresponde a la aplicación de inhibidores en el suelo que se añaden a los fertilizantes con nitrógeno para reducir las pérdidas cuando se aplica al cultivo. Estos inhibidores desactivan la enzima responsable de la primera etapa de nitrificación, la oxidación de NH_4^+ a NO_2^- (Sanz-Cobena et al., 2017). A través de la reducción de NO_3^- disponible para la desnitrificación, los inhibidores pueden también reducir la desnitrificación inducida por la pérdida de N. Estos inhibidores tienen como objetivo aumentar la eficiencia en el uso del nitrógeno y reducir la lixiviación de nitratos, y por tanto reducir las emisiones de óxido nitroso N_2O (Huérfano et al., 2015). En este trabajo se evalúa el efecto del DMPP (3,4- Dimethylpyrazole phosphate) sobre las emisiones de gases de efecto de invernadero del maíz en regadío y del trigo en secano. Este inhibidor se considera como el más eficiente en Aragón según la información proporcionada por la Unidad de Suelos y Riegos del CITA.

Para determinar los cultivos en los que se pueden aplicar estos inhibidores para reducir las emisiones del N_2O , se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica de la información proporcionada de los experimentos del CITA.

Sanz-Cobeña et al. (2017), señalan que los inhibidores de nitrificación pueden reducir las emisiones del N_2O entre un 30 y un 50%. El inhibidor DCD aumenta el rendimiento entre un 5 y un 10% mientras que el DMPP no afecta al rendimiento. En este trabajo, se considera la utilización del DMPP con una reducción del 30% en las emisiones de óxido nitroso. El coste de este inhibidor es 31,2 €/ha (Pellerin et al., 2017).

Laboreo reducido

La reducción del laboreo y la siembra directa puede ser una opción interesante para la lucha contra el cambio climático. Esta medida tiene como fin aumentar el secuestro de carbono atmosférico en el suelo durante el proceso de fotosíntesis por la reducción de la descomposición microbiana, y promover la incorporación de residuos de cultivos en el suelo (Álvaro-Fuentes et al., 2014; Sánchez et al., 2014, 2016). Se consigue aumentar la estabilización física del suelo (Álvaro-Fuentes et al., 2008), y también puede aumentar el rendimiento de la cebada un 1,55% (Morell, 2011). Sánchez et al. (2016) muestran que la respuesta de la labranza reducida mitiga las emisiones en 0,32-0,47 tCO₂e/ha/año en comparación con la labranza convencional.

En este trabajo, la reducción del laboreo se aplica al trigo y la cebada en secano y en regadío, y al maíz en regadío. En el trigo la cebada la reducción del laboreo consigue el secuestro de carbono en el suelo con una disminución de emisiones de 0,47 tCO₂e/ha/año (Sánchez et al., 2016), en el maíz la

disminución de emisiones es del 28% (Forte, 2017).

La reducción del laboreo disminuye los costes de maquinaria y ahorra trabajo y combustible (Álvaro-Fuentes et al., 2014), pero requiere inversiones en la maquinaria de siembra directa (Sánchez et al., 2014, 2016). Sánchez-Girón et al. (2004) señalan que la reducción de laboreo disminuye los costes totales, aun incluyendo la inversión en la siembra directa. El coste analizado de la siembra directa es 73,4 €/ha y el coste evitado de la maquinaria no utilizada es 84,7€/ha (MAGRAMA, 2008).

Rotación de cultivos con leguminosas

La rotación de cultivos con leguminosas permite aumentar el contenido de carbono en el suelo, restaurando la estructura y la fertilidad del suelo (Benlhabib et al., 2014) y reduciendo la necesidad de nitrógeno y por tanto las emisiones de óxido nitroso. Según Sanz-Cobena et al. (2017), el mayor potencial de las leguminosas para mitigar las emisiones GEI proviene de la reducción de emisiones de los fertilizantes.

En este trabajo la cebada y el trigo en secano se han considerado como los cultivos más favorables para esta medida que permite reducir el uso de fertilizantes en un 50% (Sánchez et al., 2016) y acumular 0,125 Mg/ha/año de carbono en el suelo (LaL y Bruce, 1999).

Cultivos cubierta

Los cultivos cubierta como la veza o el trébol se plantan junto a cultivos habituales de cereales o leñosos, o bien para remplazar el barbecho. Al cubrir la superficie de tierra se consigue mejorar la estructura del suelo y la capacidad de retención del agua (Marquez-Garcia et al., 2013), y mejorar la fertilidad y la calidad microbiana del suelo (Balota et al., 2014). Además, aumenta el secuestro de carbono en el suelo, y la protección del suelo contra la erosión evitando la escorrentía y la pérdida de sedimentos (Blanco-Canqui et al., 2015). Sanz-Cobena et al. (2017) señalan que el secuestro de carbono en el suelo supone una reducción de 10% de las emisiones GEI en las regiones mediterráneas, especialmente óxido nitroso. En este trabajo se aplican tres tipos de cultivos cubierta para el maíz, la cebada, el trigo y la veza.

En el maíz los cultivos cubierta mejoran la eficiencia del uso del nitrógeno y reducen el lavado de nitrato en los periodos de precipitación (Salmerón et al., 2011). Por otra parte, los cultivos cubierta reducen el coste de fertilización de los cereales en un 23% (Gabriel y Quemada, 2011).

En relación al efecto de los cultivos cubierta sobre el rendimiento, Salmerón et al. (2011) señalan que en el caso de la veza el cultivo cubierta no afecta al rendimiento, mientras en el caso de la cebada la pérdida de rendimiento es de 1 a 4 t/ha. Gabriel y Quemada. (2011) indican que el rendimiento del maíz aumenta el 1,1% para la veza y el 1,06% para la cebada. Sanz-Cobena et al. (2017) señalan que el

efecto del cultivo cubierta sobre el rendimiento es variable.

Los cultivos cubierta también se aplican por el almendro, viñedo y olivar, considerando que los cultivos cubierta en los sistemas leñosos permiten acumular 0.35 Mg C/ha/año en el suelo. Esta cifra es la media estimada en un periodo superior a 10 años (González-Sánchez et al., 2012). Gabriel y Quemada (2011) indican que los cultivos cubierta no afectan al rendimiento de los leñosos.

Medidas para la ganadería

Plantas de tratamientos de estiércol

El uso de tecnologías de tratamiento de estiércol permite reducir las emisiones directas e indirectas de óxido nitroso y de metano. Estas tecnologías requieren fuertes inversiones y tienen altos costes de operación y mantenimiento. En este trabajo, se considera una planta de 50.000 m³/año con procesos de nitrificación y desnitrificación que requiere una inversión de 1,5 millones de € para un periodo de 15 años (Flotats et al., 2011). El coste de la inversión es 2 €/m³ y el coste de operación es 5 €/m³, con un coste total de 7 €/m³.

Estas plantas de tratamientos de estiércol permiten reducir el 60% de las emisiones directas e indirectas y de las emisiones del manejo de estiércol (Teresa et al., 2016). Las emisiones indirectas se estiman a partir de la información del gobierno de Aragón (2009), que establece un valor del 20% a la fracción lixiviada sobre el total de la cantidad de nitrógeno.

Cambio en la dieta de los animales: adición de lípidos

La adición de lípidos en la dieta de los animales reduce las emisiones de la fermentación entérica de los rumiantes. En el vacuno de leche, los lípidos aumentan la densidad de energía en la dieta, mejoran el rendimiento de leche, y modifican la composición de los ácidos grasos en la leche (Ashes et al., 1997). Un aumento del 1% de los lípidos en la dieta de los rumiantes reduce del 4 al 5 % las emisiones de metano (Beauchemin et al., 2008; Martin et al., 2010). Dong et al. (1997) señalan que la adición excesiva de lípidos puede deprimir la degradación y la digestión de fibras en el rumen. La cantidad de lípidos añadida no debe superar el 5-6% (Boadi et al., 2004). En este trabajo se estima el potencial de reducción mediante la adición del 4% de lípidos para ovinos y bovinos. La adición del 1% de lípidos tiene un coste de 22 €/animal/año (Pellerin et al., 2017).

Reducción de proteína en la dieta de Porcino

El ajuste de la cantidad de proteína en la dieta del porcino a sus necesidades permite reducir el nitrógeno excretado en el estiércol, y las emisiones de óxido nitroso y metano del manejo de estiércol. Rotz (2004) muestra que una reducción del 1% en la cantidad de proteína disminuye un 8,5% el nitrógeno excretado. El MAPAMA (2014c) señala que una dieta baja en proteína reduce las emisiones

de metano en un 30%.

Los costes de la reducción de proteína en la dieta varían en los últimos años entre -3,86 y 1,61 €/plaza/año (MAPAMA, 2014c). En este trabajo, se utiliza un coste de -1,1€/animal/año.

Medida forestal

Manejo forestal orientado a captura de carbono

La captura de carbono de los bosques tiene una función importante en la mitigación del cambio climático. La acumulación de biomasa y de carbono en las masas forestales varía según la especie, la localización, las condiciones climáticas, y el manejo forestal. Las áreas mediterráneas se caracterizan por su variabilidad climática, unas condiciones cálidas y secas, y unas precipitaciones irregulares. Estas características favorecen la frecuencia de los incendios forestales que provocan daños en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. Vayreda et al. (2012) indican que el cambio climático está causando una reducción en la capacidad de absorción de carbono de los bosques españoles no gestionados, debido a la menor disponibilidad de agua. Además, los escenarios de cambio climático apuntan un futuro más complicado por el aumento de temperaturas. En consecuencia, un manejo forestal más sostenible es fundamental para mantener estos ecosistemas forestales, y poder conservar su diversidad biológica y su capacidad de regeneración, asegurando su viabilidad. Existen diferentes opciones de manejo forestal que pueden incrementar la captura de carbono, mejorar el estado nutricional de las plantas, reducir los incendios forestales, y controlar las enfermedades y plagas. Entre estas intervenciones de manejo forestal se puede mencionar las cortas, claras, y modificaciones del turno.

Según Ruiz-peinado et al. (2017), un sistema de bosques con diferente edad es una opción importante para aumentar el secuestro de carbono mediante la entrada continua de hojarasca. Con ello se asegura la protección permanente del suelo y de las cuencas hidrográficas, mientras que los bosques de edad uniforme pueden conducir a pérdidas de carbono en los periodos en que el suelo se queda sin cobertura. El momento de la corta también influye en el almacenamiento de carbono: el momento óptimo de cortar los arboles es cuando alcanzan su crecimiento medio máximo, ya que ofrecen la máxima producción forestal y otros bienes y servicios ambientales. La modificación de la amplitud del turno tiene diferentes efectos sobre el almacenamiento de carbono, ya que el almacenamiento de carbono es mayor en los turnos largos que en que los turnos cortos. Los turnos largos permiten obtener productos de mayor tamaño y con un elevado contenido de carbono tanto en el suelo como en las plantas, mientras que los turnos cortos permiten obtener un mayor crecimiento anual medio (Bravo, 2007). Una duración excesiva del turno puede tener efectos negativos como la reducción de la producción primaria neta y el aumento de la tasa de mortalidad de las plantas.

La clara es una intervención silvícola importante en el manejo sostenible de los bosques y tiene ciertos objetivos económicos y silvícolas al reducir la competencia entre los árboles para conseguir una mayor estabilidad biológica y mejorar la salud de los rodales. También permite preparar la masa para la regeneración natural, y aumentar el valor y la dimensión de los productos finales (Rio, 1999). Ruiz-Benito et al. (2013) indican que las claras pueden ser una estrategia adecuada para la adaptación al cambio climático. Para abordar al problema del cambio climático y aumentar el secuestro de carbono, muchos estudios estiman la tasa de carbono secuestrada en diferentes regímenes de manejo que se orientan a la fijación de carbono. Bravo et al. (2007) señalan que la intervención siempre genera una mayor fijación de carbono en las masas forestales, con un aumento de la fijación de carbono de 12,5% en un escenario de tres claras a partir de los 20 años en comparación con un escenario sin intervención.

Ruiz-Peinado et al. (2011) muestran que la clara ligera tiene mayores reservas de biomasa de carbono en comparación con escenarios sin intervención o de claras intensivas. D'Amato et al. (2011) señalan que las claras intensivas reducen la tasa de secuestro de carbono, pero aumentan la disponibilidad del agua para las plantas. Las claras ligeras consiguen un valor elevado de fijación de carbono in situ, pero incrementan el riesgo de perturbación natural en áreas vulnerables. Como señalan Ruiz-Peinado et al. (2017), la clara es una intervención que se aplicada no solo para fijar carbono, reducir el riesgo de incendios, y evitar los periodos de estancamiento, sino también para producir biomasa y contribuirá la reducción de las emisiones de combustibles fósiles.

El carbono almacenado varía según la especie, la calidad del sitio (clima y suelo), y el régimen de gestión. El régimen de gestión forestal depende de la edad de iniciación, la especie, el área bisimétrica extraída, y el número de intervenciones. En este trabajo se estima el coste-eficiencia de tratamientos silvícolas dirigidas a incrementar la fijación de carbono para las especies pino silvestre (*pinus sylvestris*) y el pino carrasco (*pinus halepensis*). Estas especies ocupan una superficie importante en la región, y se caracterizan por su potencial de captura de carbono.

La tasa de captura de carbono por el *pinus halepensis* está determinada a partir de un estudio del Gobierno de Aragón que simula la fijación de carbono con distintas alternativas de manejo forestal de la vegetación leñosa de Aragón. En el estudio se examinan dos alternativas de manejo del *Pinus halepensis*: evolución natural sin actuaciones, y un tratamiento silvícola que corresponde a claras moderadas. Este tratamiento consiste en cortas cada 10 años desde los 20 años, y una corta final a los 80 años. La intensidad de las claras es limitada hasta los 40 años, y aumenta un 8%, 12,5%, 16,2% hasta la corta final del 100%. El secuestro de carbono aumenta un 70% con las claras realizados en comparación con un escenario sin intervención (Gobierno Aragón, 2008).

En cuanto al *pinus sylvestris*, Ruiz-peinado et al. (2017) señalan que la captura de carbono

aumenta cerca del 60% con la realización de claras ligeras respecto a un bosque no gestionado. El documento del Gobierno Aragón (2008) muestra que un tratamiento silvícola basado en el aumento del turno hasta los 120 años con aplicación de claras incrementa la captura de carbono un 51% en comparación con un tratamiento con turno de 80 años. Bravo et al. (2008) muestran que el aumento del turno de 80 hasta 120 años, aumenta la captura de carbono entre 13 y 42% por hectárea. En este trabajo, se considera el tratamiento silvícola planteado en el documento del Gobierno de Aragón (2008) basado a claras cada 10 años desde los 30 años hasta la corta final a los 120 años, con una intensidad que varía entre el 3 y 7 % hasta la corta final (100%).

Los costes de estas intervenciones forestales son variables según especie, densidad, pendiente, sitio y maquinaria utilizada. La Oficina Nacional Forestal (ONF, 1993) estima un coste de 715-1.053 €/ha para las claras de pinus halepensis. La diputación de Barcelona (2008) estima también un coste medio que varía entre 750 y 800 €/ha en Cataluña para el pinus halepensis, y un coste para el pinus silvestris de 600 €/ha para árboles jóvenes que tienen menos de 15 años, y 900 €/ha para los que tienen un diámetro superior a 10 cm. En este trabajo, se realiza una estimación de los costes según la intensidad de clara realizada. Los costes de las claras son una estimación a partir de los costes calculados con los estudios de Tolosana et al. (2018) y Tolosana et al. (2002); se considera un coste de 30 €/m³ de madera extraída en cada clara. El análisis de los costes unitarios, basado en el coste de alquiler de las máquinas para la tala y el agrupamiento y el coste de transporte. El coste considerado por la corta final es de 20 €/m³. Este coste es determinado a través el estudio de Pascual et al. (2018).

El aprovechamiento de la producción de madera se determina a partir de la densidad, el contenido de carbono por metro cúbico, y la captura de carbono en cada clara. La madera seca que se aprovecha representa generalmente una 51% sobre el peso húmedo (Tolosana et al., 2011). La madera del pinus silvestris se aprovecha y se vende a las empresas en cada clara y en la corta final, mientras que en el caso del pinus halepensis se aprovecha solamente la madera de la corta final.

Los precios de la madera se han tomado del observatorio de precios de los productos forestales del 2014 elaborado por la Confederación de Organizaciones de Selvicultores de España (Redfor, 2014), la diputación de Barcelona en 2008, y la información proporcionada por la Unidad de Recursos Forestales del CITA. Los precios que se utilizan son 40 €/m³ para el pinus silvestris, y 33 €/m³ para el pinus halepensis.

Cuadro 3.8. Resumen de las estimaciones de costes de implementar las prácticas de mitigación por tipo de cultivo en Aragón y sus efectos.

Medidas	Coste privado	Beneficio privado	El efecto sobre el rendimiento	Otros efectos
Ajuste de la fertilización nitrogenada Todos los cultivos	0	Reducción del coste de N aplicado Precio= 1,037€/kg N (Kahil, 2011).	Ningún efecto	
Substitución de la fertilización mineral por fertilización orgánica Todos los cultivos	El coste de transporte y aplicación de estiércol a 10 km. Coste de un kg de N = 0,74€ (Daudén et al., 2011)	Coste del abonado mineral reducido Precio= 1,037€/kg N (Kahil, 2011).	Ningún efecto	Posible contaminación y problemas de salud (Sanz-Cobena et al., 2017).
Laboreo reducido	Coste anual de la siembra directa (MAGRAMA, 2008).	Reducción del coste de maquinaria (MAGRAMA, 2008).	Aumento del rendimiento para los cereales y ningún efecto para el maíz (Morell et al., 2011)	Producción de malas hierbas y problemas de compactación del suelo. Posibles problemas de contaminación debido al uso de herbicidas (Smart Soil, 2015).
Cebada secano/regadío	37,4	84,7	1,55%	
Trigo secano/regadío	37,4	84,7	1,55%	
Maíz	37,4	84,7	0	
La rotación de cultivos con leguminosas	No requiere ningún coste (Sánchez et al., 2016)	Reducción del coste de una 50% del abonado mineral (Sánchez et al., 2016)	Aumento de rendimiento (López-Bellido.,2001; Diaz-Ambron y Minguez, 2001)	
Cebada secano	0	1,037€/kg de N (Kahil, 2011).	1,35%	
Trigo secano	0	1,037€/kg de N	1,4%	
Cultivos cubierta	Semillas y coste anual de una sembradora neumática para los cultivos leñosos (Sánchez et al., 2016)	El coste del N se reduce un 23% para los cereales (Gabriel y Quemada, 2011) Precio= 1,037€/kg N (Kahil, 2011).	Ningún efecto	
Maíz	31 €/ha (veza), 42 €/ha (trigo/cebada)			
Almendra	58,4€/ha			
Viñedo	53,9 €/ha			
Olivar	57,4 €/ha			

Inhibidores de nitrificación (DMPP) Trigo secano Maíz regadío	Coste del inhibidor 31,2 €/ha (Pellerin et al., 2017)	0	Ningún efecto sobre el rendimiento (Sanz- Cobena et al., 2017)	Aumento de las emisiones del amoníaco
Modernización del sistema de riego Todos los cultivos	El coste de modernización anual es 385 €/ha/año (Guardia et al., 2010).	Reducción del N aplicado y aumento del margen neto debido al aumento del rendimiento.	Aumento de rendimiento	Posible acumulación de metales pesados en cultivos (Sanz- Cobena et al., 2017).
Plantas de tratamientos de estiércol	Coste anual de inversión y de operación de la planta es 7 €/ m ³ de estiércol (Flotats et al., 2011; Albiac et al., 2016; Teresa et al., 2016).	0		
Cambio en la dieta de los animales: adición de lípidos	Coste de adición de 1% de lípidos igual a 22 €/animal/año (Pellerin et al., 2017)	0	Mejora el rendimiento de leche y su composición en ácidos grasos (Ashes et al., 1997)	La adición excesiva de lípidos afecta a la digestión de fibras (Dong et al., 1997a)
Reducción de proteína en la dieta del porcino		Coste de la reducción de proteína es de 1,1€/animal/año (MAPAMA, 2014)		
Cambio en el manejo de los bosques Pinus silvestris Pinus halepensis	Coste del tratamiento forestal: (Tolosana et al., 2018; 2002), (Pascual et al., 2018). Coste de la clara (30€/M ³) Coste de la corta final (20€/m ³);	precio de la madera 40 €/m ³ 33 €/m ³	Aumento del secuestro de carbono en la biomasa lo que aumenta la productividad de la madera.	

3.2.3. El enfoque de la curva del coste de reducción marginal (MACC)

La curva de coste de reducción marginal (MACC) de emisiones GEI fue utilizada por primera vez por MacCarl y Schneider (2000) para analizar las políticas de mitigación en la agricultura de Estados Unidos. Posteriormente se ha utilizado en distintos análisis a escala global, regional y nacional (Moran et al., 2011; MacLeod et al., 2010; Wang et al., 2014; Pellerin et al., 2017; Albiac et al., 2017).

La curva MACC es una herramienta de análisis de políticas de mitigación del cambio climático que sirve para determinar el potencial de reducción de emisiones de las alternativas de mitigación y sus costes asociados, con lo que se pueden identificar las intervenciones más efectivas y facilitar el intercambio entre los estudios científicos y la toma de decisiones políticas.

Las etapas de elaboración de la curva MACC son la selección de medidas, la recogida de datos biofísicos y económicos específicos de la región, el cálculo del potencial de reducción de cada medida y sus costes asociados y por último la representación de la curva.

Las medidas seleccionadas de mitigación del cambio climático deben contribuir a la seguridad alimentaria para ser socialmente aceptables. También es necesario evaluar la relevancia de las medidas, su aplicabilidad en la zona de estudio, y la aceptabilidad por parte de los agricultores. La curva MACC requiere de una amplia gama de datos de ciencias naturales y sociales (datos sobre uso de tierra, procesos biofísicos, estadísticas del sector agrario, información económica de las explotaciones) para poder calcular el potencial de mitigación de cada medida. Los conceptos utilizados en la construcción de la curva MACC son el potencial de reducción y el coste-eficiencia de cada medida.

$$\text{Potencial de reducción} = \text{tasa de reducción de la medida} * \text{nivel de actividad} \quad (\text{tCO}_2\text{e}) \quad (12)$$

$$\text{Coste – eficiencia} = \frac{\text{coste de la medida}}{\text{potencial de reducción}} \quad (\text{€/tCO}_2\text{e}) \quad (13)$$

La Figura 3.3 muestra un esquema de las etapas principales de la construcción de la curva MACC para el sector primario. En primer lugar, se selecciona las distintas medidas de mitigación basándose en la literatura y se evalúa los efectos secundarios y la aplicabilidad de las medidas seleccionadas en la región. Después se determina para cada medida el tipo de actividad y las regiones donde se puede implementar. También se recopila información sobre los costes y la efectividad de las medidas de mitigación. A continuación se calcula el potencial de reducción y el coste-eficiencia de cada medida de forma individual y de forma conjunta con otras medidas. Por último, se elabora la curva de coste marginal de reducción.

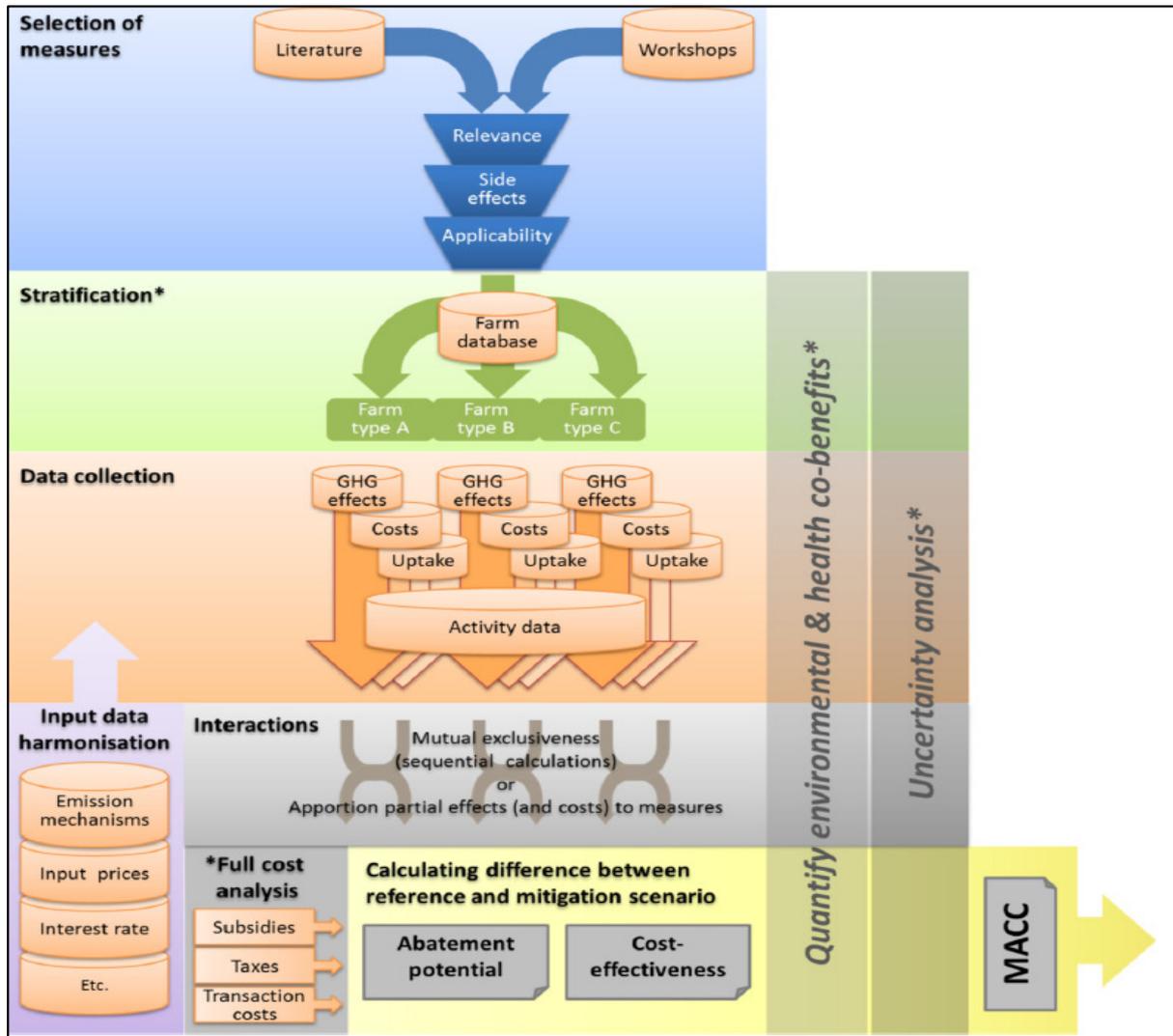


Figura 3.3. Los pasos claves de la elaboración del MACC.

Fuente: Eory et al. (2018).

MacLeod et al. (2015) señalan que la curva MACC tiene limitaciones ya que cada investigador decide la inclusión o la exclusión de los costes de transacción, subvenciones e impuestos. En la mayoría de los casos, la curva MACC incluye únicamente los costes técnicos directos asociadas a la implantación de la medida, debido a la complejidad de estimar los costes de transacción.

La curva MACC es una figura basada en la representación de una serie de barras discretas con costes ascendentes y con la reducción de emisiones. Cada una de las barras representa una medida de mitigación. El ancho de cada barra representa la reducción de las emisiones de GEI (MtCO₂e), mientras que la altura de la barra muestra el coste de la medida (€/tCO₂e), (Figura 3.4).

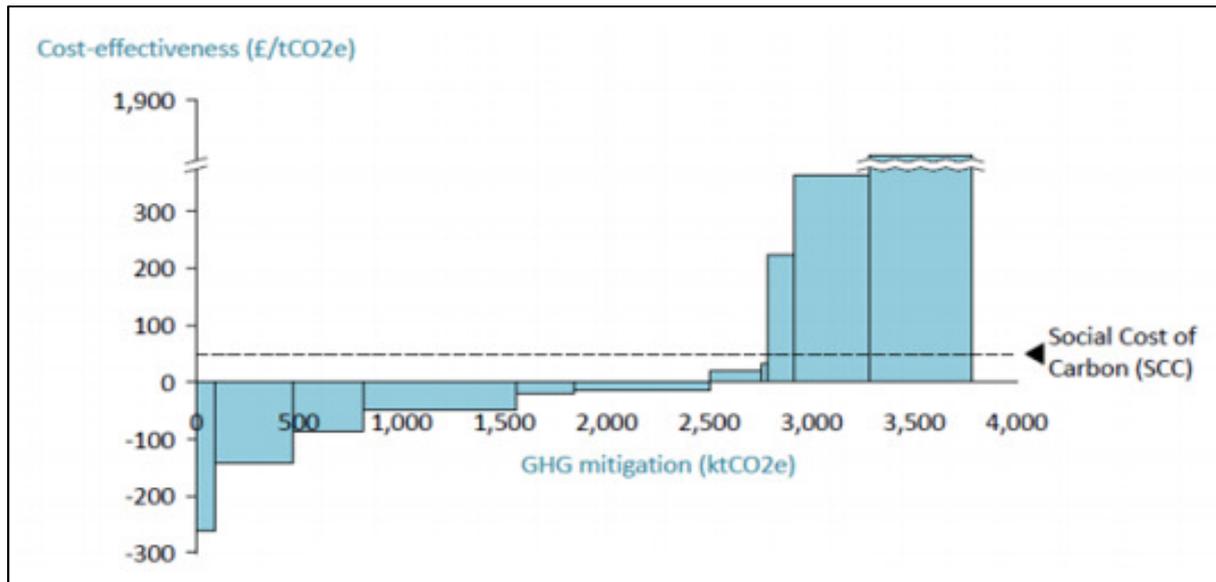


Figura 3.4. La curva de coste de reducción marginal (MACC).

Fuente: MacLeod et al. (2015).

Esta figura tiene dos componentes, el primero representa el potencial de reducción de las medidas que tienen costes negativos por lo que generan beneficios económicos y ambientales. Es decir estas medidas permiten reducir las emisiones GEI y reducir los costes de producción para los agricultores, por lo que se denomina medidas de mitigación win-win (Moran et al., 2013). El segundo componente representa las medidas que tienen un coste-eficiencia positivo. La implantación de estas medidas tiene un coste privado para los agricultores, y generan beneficios ambientales.

3.3. Escenarios de políticas de mitigación de emisiones agrícolas en 2050

En la elaboración de escenarios de políticas de mitigación del sector agrario en Aragón para el horizonte 2050, se tiene en cuenta la evolución futura de la agricultura. A partir de la evolución de la agricultura se calculan las emisiones y se estiman las consecuencias de tomar o no medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. Se plantean tres escenarios que difieren según el grado de aplicación de las medidas de mitigación.

Para analizar los diferentes escenarios se proyecta el sector agrario hacia el futuro, teniendo en cuenta la incertidumbre sobre el uso de la tierra y de los recursos naturales, y sobre la sostenibilidad de los sistemas alimentarios y agrícolas. El aumento de la población y de la demanda de los alimentos son factores que aumentan la presión sobre el sector agrario. Estos factores redundarán en la necesidad de incrementar la producción agraria mediante la intensificación de la agricultura, el uso de nuevas tecnologías y la ampliación de los canales de transformación y comercialización. Todos estos factores junto con el incremento de la temperatura y los efectos del cambio climático afectan a los recursos naturales y a los servicios de los ecosistemas.

La FAO (2017) estima que la población mundial alcanzará los 9.700 millones de personas en los próximos 30 años, por lo que la productividad en la producción de alimentos debe aumentará un 70%. La demanda anual de los cereales crecerá en 1000 millones de toneladas, y la producción de carne alcanzará los 470 millones de toneladas en 2050. La demanda de agua en la agricultura de regadío aumentará, pero el agua disponible se reducirá por los efectos del cambio climático y por la mayor frecuencia e intensidad de las sequías, lo que agravará la competencia por los recursos hídricos. Alexanderatos y Bruinsma (2012) estiman que la superficie de regadío en el mundo solo tendrá un aumento marginal del 0,1% en el año 2050 en comparación con 2007. El crecimiento de estas áreas dependerá de los recursos hídricos en cada región, de las zonas adecuadas para riego, y de los costes crecientes de las inversiones en regadío.

Schmitz et al. (2014) proyectan la superficie agrícola en 2050 bajo condiciones climáticas constantes, y señalan que la superficie debería aumentar entre 10 y 25% respecto a 2005. Holman et al. (2017) indican que las condiciones agronómicas, la extensión de la sequía y la disminución de la rentabilidad en Europa provocarán la disminución y el cambio en el uso de tierra agrícola en zonas como España, sur de Francia e Italia, y una demanda creciente de las tierras agrícolas que reducirá la superficie forestal en los países escandinavos.

La Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE, 2015) señala que la demanda de agua de uso agrario en la cuenca del Ebro puede alcanzar los 9.800 hm³ en 2033. También estima una disminución de las precipitaciones de 47,9 mm con un calentamiento de 1,9 °C en el periodo 2040-2070. El efecto del cambio climático tendrá impactos significativos sobre los recursos hídricos, y con una caída del 25% en la disponibilidad de agua en el periodo 2040-2070.

En este trabajo se ha planteado un escenario futuro con una caída del 25% en la superficie de regadío de cebada y trigo por la escasez y la disminución de recursos hídricos en la región, y un aumento de la cabaña ganadera de porcino del 30%. El número de cabezas de porcino en 2050 se determina a partir de la proyección del aumento histórico del porcino en Aragón.

Los tres escenarios de mitigación analizan el sector agrario en el horizonte 2050. Estos escenarios se diseñan según el grado de aplicación de las medidas de mitigación de las emisiones GEI planteados anteriormente. Los escenarios analizados son las siguientes:

Un escenario continuista (S1) que proyecta la situación actual del sector agrario en el futuro sin que exista ningún esfuerzo para limitar las emisiones GEI. Este escenario mantiene la situación actual en ausencia de medidas y políticas de mitigación que reduzcan las emisiones GEI y protejan el medio ambiente. El escenario BAU representa las emisiones futuras y los efectos de no tomar medidas de

mitigación y adaptación al cambio climático.

Un segundo escenario (S2) considera que en la proyección del sector agrario en el futuro se aplican las medidas más viables y eficientes en Aragón. Las medidas seleccionadas son la reducción de la fertilización mineral a las necesidades de los cultivos, la sustitución de fertilización mineral por fertilización orgánica, y el laboreo mínimo con siembra directa. La selección de estas medidas se realiza según los resultados del análisis coste-beneficio y de la curva MACC realizados que se han obtenidos anteriormente. Este escenario supone la implicación de los agentes y los agricultores ante el problema del cambio climático, y el surgimiento de cooperación entre ellos para enfrentar al cambio climático. El inicio de la acción colectiva entre los agricultores y otros agentes se apoyen la información generada sobre la reducción de emisiones GEI para mitigar el cambio climático.

Un tercer escenario más optimista (S3) considera que en la proyección de futuro se aplican todas las medidas de mitigación planteadas anteriormente. Este escenario describe un futuro más sostenible con una importante reducción de emisiones GEI del sector agrario. Este escenario representa una fuerte cooperación entre los agentes ante el cambio climático, la protección del medio ambiente, la conservación de los recursos naturales, y la mejora de la calidad del aire y del agua.

La estimación del potencial de mitigación en 2050 bajo cada escenario se realiza utilizando las mismas herramientas y metodologías utilizadas en la primera parte del trabajo.



Capítulo 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Y

DISCUSIÓN

Capítulo 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras la descripción en el capítulo anterior de la metodología y las herramientas utilizadas, en este capítulo se presentan los resultados del balance de emisiones en Aragón y el potencial de reducción de las emisiones GEI de las medidas seleccionadas, tanto de forma individual como conjunta teniendo en cuenta las interacciones entre ellas. Por último, se presenta los resultados de los escenarios de políticas de mitigación aplicados a la proyección de la agricultura aragonesa en el futuro.

4.1. Inventario de las emisiones GEI en Aragón

El balance de emisiones en Aragón muestra que las emisiones GEI alcanzan los 4,1 millones tCO₂e, lo que representan el 25% del total de emisiones de la región. Esta carga de emisiones se localiza sobre todo en las comarcas de Monegros (14%), Cinco Villas (11%), la Litera (9%) y Hoya de Huesca (6%) debido a la concentración de los cultivos en regadío y de la cabaña de porcino en estas comarcas (Figura 4.1). Las emisiones GEI provienen principalmente de las emisiones de metano y óxido nítrico del manejo de estiércol, que alcanzan 1,6 MtCO₂e y 0,9 MtCO₂e, respectivamente. Las emisiones directas e indirectas de óxido nítrico provenientes de la fertilización nitrogenada de los cultivos son 0,9 MtCO₂e, con un 70% de emisiones directas y un 30% de emisiones indirectas por lixiviado y escorrentía (Cuadro 6.6). Las emisiones de la fermentación entérica de los rumiantes alcanzan 0,6 MtCO₂e y contribuye un 17% del total de emisiones agrarias. En comparación, Kahil y Albiac (2012) han estimado unas emisiones GEI de 3,5 MtCO₂e en 2008.

Las emisiones de óxido nítrico de los cultivos en regadío suponen el 68% del total de emisiones directas e indirectas y representan casi el doble que las emisiones del secano (32%), (Cuadro 6.7). La mayoría de las emisiones provienen principalmente de los herbáceos (91%), mientras que los leñosos emiten solamente un 9% de las emisiones del regadío. El riego por inundación con mayores emisiones de N₂O en comparación con los sistemas de riego por aspersión y localizado. El riego por inundación emite el 56% de las emisiones del regadío, el riego por aspersión el 40%, y el riego localizado el 4% (Cuadro 4.1).

El maíz es el cultivo con mayores emisiones que alcanzan el 47% de las emisiones del N₂O en regadío, seguido de cebada (22%), trigo (11%) y alfalfa (8%). Las emisiones del maíz son importantes tanto en riego por inundación (30%) como en aspersión (76%). Los cultivos con menores emisiones son guisante, cebolla, almendro, viñedo y olivar.

Cuadro 4.1. Emisiones directas e indirectas del óxido nitroso (tCO₂e/ha/año).

Cultivos	Emisiones directas (tCO ₂ e/ha/año)				Emisiones indirectas (tCO ₂ e/ha/año)			
	Inundación	Aspersión	Goteo	Secano	Inundación	Aspersión	Goteo	Secano
Cebada	1,16	0,87		0,45	0,44	0,29		0,09
Maíz	2,62	2,04			2,33	1,40		
Alfalfa	0,49	0,33			0,37	0,24		
Trigo	1,16	1,05		0,26	0,56	0,26		0,06
Arroz	1,16				0,58			
Guisante	0,52		0,35		0,19		0,12	
Cebolla	1,16		0,81		0,39		0,27	
Melocoto nero	1,16		0,87		0,70		0,52	
Olivar	0,70		0,58	0,35	0,42		0,35	0,07
Viñedo	0,70		0,58	0,26	0,42		0,35	0,06
Almendro	0,58		0,47	0,26	0,35		0,28	0,06
Cerezo	0,58		0,47		0,35		0,28	
Manzano	0,87		0,76		0,52		0,45	

Las emisiones de la ganadería representan el 77% del sector agrario de la región, y consisten en emisiones de metano y óxido nitroso del estiércol y emisiones de metano de la fermentación entérica. Estas emisiones se concentran en las comarcas de Monegros (399.000 tCO₂e), La Litera (339.000 tCO₂e), Cinco Villas (313.000 tCO₂e), Bajo Cinca (207.000 tCO₂e) y Cinco Medio (179.000 tCO₂e).

Las emisiones de metano de la fermentación entérica representan el 21% de las emisiones ganaderas, y están compuestas por emisiones de bovino (48%) y de ovino (52%). La mayor parte de las emisiones de metano de la fermentación entérica del bovino provienen del vacuno de carne. Las emisiones de metano y óxido nitroso del estiércol representan el 50% y el 29% de las emisiones ganaderas, respectivamente, y la fuente principal es la cabaña de porcino.

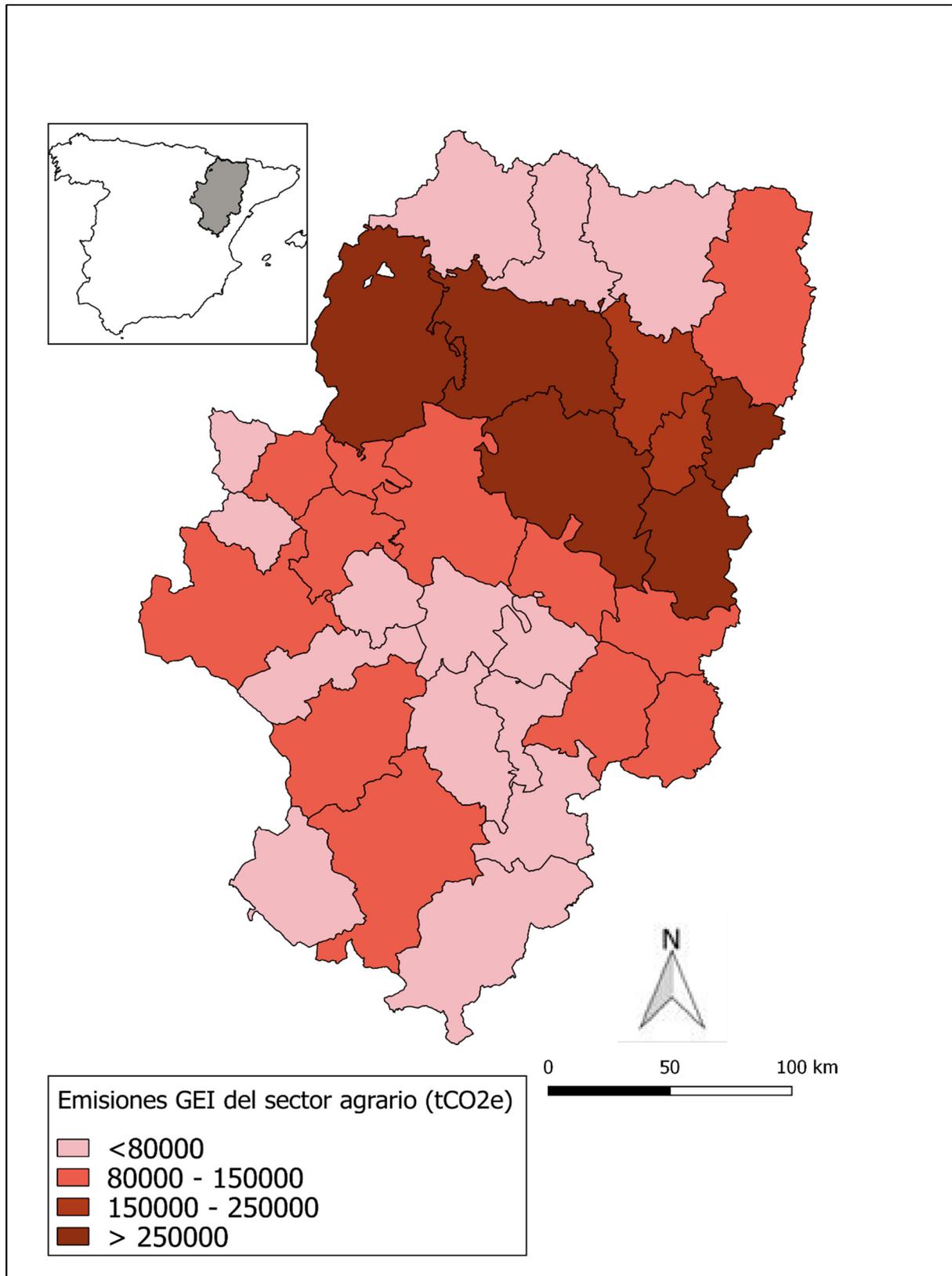


Figura 4.1. Las emisiones GEI del sector agrario en Aragón.

4.2. El potencial de reducción de las medidas de mitigación

El análisis de la curva MACC sirve para evaluar el potencial de mitigación de las medidas seleccionadas, y para examinar los costes y el efecto de cada medida sobre la renta de los agricultores y el bienestar de la sociedad. El análisis también sirve para evaluar el daño medioambiental y su impacto en la sociedad. El escenario base o situación actual muestra la asignación de suelos entre cultivos, la producción, la renta de los agricultores, la cantidad de inputs utilizada, y las emisiones GEI en Aragón (Cuadro 4.2).

La superficie cultivada en el escenario base es de 1.036 mil hectáreas y el uso de agua y nitrógeno alcanza el 2224 hm³ y 113.000 toneladas de N, respectivamente. La renta neta de los agricultores es 484 M€ y el bienestar social de las actividades de cultivos es igual al 318 M€. El bienestar de la sociedad representa la diferencia entre la renta de los agricultores y el valor del daño medioambiental.

El daño medioambiental se estima a partir de las emisiones GEI y el coste social del carbono. El coste del daño medioambiental de las emisiones GEI es una información escasa en la literatura y es difícil de determinar. El IPCC (2007a) estima un coste social del carbono de 10 €/tCO₂e, mientras que Tol (2004) lo eleva a 14 €/tCO₂e. Además, Watkiss (2005) indica que el coste máximo del daño medioambiental es de 80 €/tCO₂e. En este trabajo se utiliza un coste social del carbono de 40 €/tCO₂e, que es el que propone la OCDE (Smith y Braathen, 2015).

A continuación se presentan los resultados de las medidas de mitigación de forma individual y de los resultados de las medidas tomadas de forma conjunta donde se tiene en cuenta las interacciones entre ellas.

Cuadro 4.2. Resultados del escenario base.

Superficie cultivada (10 ³ ha)	1.036
Renta de los agricultores (10 ⁶ €)	484
Daño medioambiental (10 ⁶ €)	166
Bienestar social (10 ⁶ €)	318
Abonado de N (10 ³ Tm)	113
Lixiviado (10 ³ Tm)	25
Uso de agua (hm ³)	2.224
Emisiones de oxidó nitroso de los cultivos (10 ³ tCO ₂ e)	949
Emisiones de metano y oxidó nitroso del estiércol (10 ³ tCO ₂ e)	2.513
Emisiones de metano de la fermentación entérica (10 ³ tCO ₂ e)	687

4.2.1. El potencial de mitigación de las medidas de forma individual

Medidas para los cultivos

Ajuste de la fertilización nitrogenada

La reducción de la fertilización nitrogenada es una medida interesante de mitigación que logra una reducción de 294.000 tCO₂e con un coste-eficiencia negativo de -130 €/tCO₂e. Muchos estudios muestran que el ajuste de la cantidad de nitrógeno tiene un potencial de reducción de las emisiones del óxido nitroso con un coste negativo (Albiac et al., 2017; Sánchez et al., 2016; Pellerin et al., 2017).

Esta medida genera beneficios económicos por la reducción de los costes de abonado (-38 M€) y genera beneficios ambientales por la reducción de las emisiones del óxido nitroso (12 M€). El resultado es que mejora la renta de los agricultores (522 M€, +8%) y el bienestar de la sociedad (496 M€, +11%) (Cuadro 4.3). Kahil. y Albiac (2012) señalan que limitar la fertilización mejora un 8% la renta de los agricultores y un 15% el bienestar social.

El coste-eficiencia y la reducción de las emisiones varían en las diferentes comarcas de la región, según el tipo de cultivos y su superficie. Las comarcas que tienen un potencial alto de reducción son Monegros (41.000 tCO₂e), Cinco Villas (34.000 tCO₂e), Hoya de Huesca (25.000 tCO₂e) y Bajo Cinca (16.000 tCO₂e).

Los cultivos apropiados para esta medida son cebada, maíz y trigo, ya que permiten alcanzar una reducción óptima de la contaminación y el máximo bienestar social. En estos cultivos el daño ambiental se reduce en un 74% (cebada: -5,9 M€, maíz: -1,6 M€, trigo: -1,5 M€) y la renta de los agricultores aumenta en 29 M€ (cebada: +20 M€, maíz: +5 M€, trigo: +4 M€). Sin embargo, los cultivos con menor reducción de emisiones utilizando esta medida son la cebolla (-0,01 M€) y la alfalfa (- 0,02 M€).

Cuadro 4.3. Resultados de la medida “ajuste de la fertilización nitrogenada”.

Medida	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O
Base	1.035.653	484	38	446	113	25	2.224	949
Ajuste de fertilización	1.035.653	522	26	496	76	18	2.224	655

Sustitución de fertilización mineral por fertilización orgánica (estiércol)

La utilización del estiércol como fertilizante orgánico es una opción importante para reducir la cantidad de nitrógeno mineral aplicado y sus correspondientes emisiones del óxido nitroso, así como para evitar los costes elevados de las tecnologías de tratamiento de estiércol (Flotats, 2011). Bajo esta medida el

abonado mineral se reduce a 76.000 tN, y disminuyen las emisiones directas e indirectas de óxido nitroso (en 218.000 y 97.000 tCO₂e, respectivamente), con un coste-eficiencia negativo de -35 €/tCO₂e. La renta de los agricultores y el bienestar de la sociedad aumentan hasta 495 M€ (+11 M€) y 470 M€ (+24 M€), (Cuadro 4.4).

Pellerin et al. (2017) señalan que la sustitución de fertilización mineral por orgánica en Francia reduce las emisiones del óxido nitroso con un coste negativo de -74 €/tCO₂e. Albiac et al. (2017) consideran un aumento de la proporción de fertilización orgánica hasta el 40% y el 55%, lo que supone un nivel de coste-eficiencia de 75 y 140 €/tCO₂e, respectivamente.

Con esta medida se consiguen reducciones de óxido nitroso en las comarcas de Monegros (57.000 tCO₂e), Cinco Villas (41.000 tCO₂e) y Hoya de Huesca (26.000 tCO₂e).

Cuadro 4.4. Resultados de la medida “Sustitución de fertilización mineral por fertilización orgánica (estiércol)”.

Medida	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N2O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	1.035.653	484	38	446	113	25	2.224	949
Sustitución fertilización mineral por orgánica	1.035.653	495	25	470	76	17	2.224	634

Modernización del sistema de riego

La modernización del regadío mejora la eficiencia del uso de agua y de los fertilizantes. Los resultados muestran una reducción de 15% en el uso de agua y de 13% en el uso de los fertilizantes. Como consecuencia, las emisiones directas e indirectas de óxido nitroso se reducen en de 99.000 tCO₂e con un coste-eficiencia de 184 €/tCO₂e (Cuadro 4.5). El coste-eficiencia es elevado porque hacen falta fuertes inversiones para modernizar los regadíos.

Esta medida disminuye tanto la renta de los agricultores (-18 M€) como el bienestar social (-14 M€). Albiac et al. (2017) indican que en España la modernización de regadíos podría reducir las emisiones en 2,1 MtCO₂e con un coste-eficiencia de 400 €/tCO₂e.

La caída de emisiones con modernización se localiza en las comarcas de Monegros (19%), Cinco Villas (18%) y Zaragoza (7%) ya que la superficie de riego por inundación es muy elevada en estas zonas.

El coste-eficiencia de la modernización es positivo (coste para los agricultores) para la mayoría de los cultivos, pero algunos cultivos presentan un coste-eficiencia negativo (reducción de costes para los agricultores) como maíz (-12 €/tCO₂e), cebolla (-209 €/tCO₂e), viñedo (-730 €/tCO₂e), melocotonero (-1520 €/tCO₂e) y manzano (-7448 €/tCO₂e). La razón es el aumento de los rendimientos de los cultivos

como consecuencia de la modernización. La modernización consigue las mayores reducciones de emisiones en los cultivos de maíz, cebada, trigo y alfalfa (Figura 4.2).

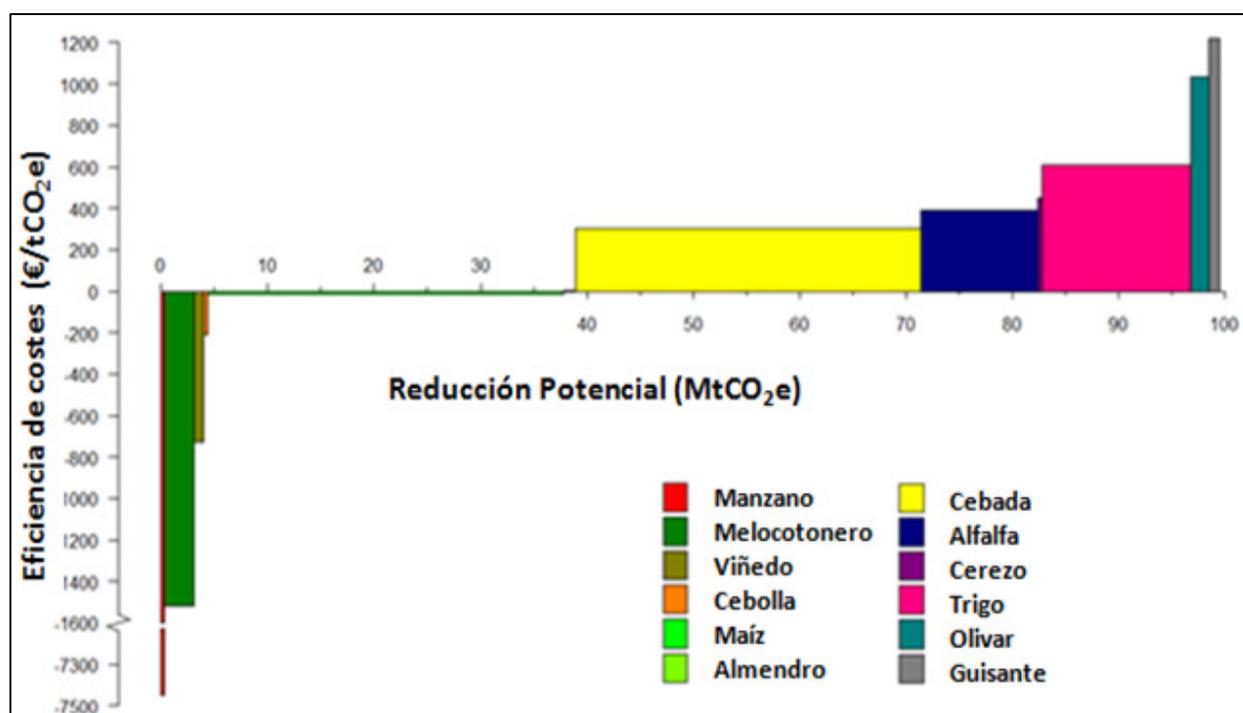


Figura 4.2. MACC de los distintos cultivos por la modernización de los sistemas de riego.

Cuadro 4.5. Resultados de la medida “Modernización de los sistemas de riego”.

Medida	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	356.897	326	26	300	70	21	2.224	645
Modernización de regadío	206.844	308	22	286	61	17	1.883	546

Inhibidores de nitrificación

Los inhibidores de nitrificación reducen las emisiones directas e indirectas de óxido nitroso en 109.000 tCO₂e con un coste-eficiencia de 74 €/tCO₂e. Pellerin et al. (2017) estiman un coste eficiencia de 60 €/tCO₂e que es casi similar a los resultados de este trabajo. El coste-eficiencia es bastante alto porque los inhibidores tienen un coste elevado. En consecuencia, la renta de los agricultores y el bienestar social se reducen en 8 y 4 M€, respectivamente (Cuadro 4.6).

Esta medida es más favorable en el caso del maíz con una reducción de daños de 84% y con un coste-eficiencia de 27€/tCO₂e. Sin embargo, el daño en el trigo solo se reduce un 16% con un coste-eficiencia de 325 €/tCO₂e.

El coste-eficiencia de la reducción de emisiones varía entre 29 y 325 €/tCO₂e en las distintas comarcas de la región. Las comarcas con mayor coste-eficiencia son Alto Gállego, Campo de Belchite, Gúdar y Cuenca Mineras, ya que estas comarcas tienen importante superficie de trigo.

Cuadro 4.6. Resultados de la medida “Inhibidores de nitrificación”.

Medida	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	260.321	156	15	141	38	12	677	363
Inhibidores de nitrificación	260.321	148	11	137	38	12	677	254

Reducción del laboreo

El laboreo reducido proporciona una reducción significativa de las emisiones cerca a los 420.000 tCO₂e con un coste negativo de -27 €/tCO₂e (beneficio privado positivo). Muchos estudios muestran que esta medida tiene costes negativos y beneficios ambientales como señalan Sánchez et al. (2016), Moran et al. (2011) y Macleod et al. (2010). Por el contrario, Pellerin et al. (2017) señalan que el laboreo reducido en Francia tiene un coste positivo, aunque poco significativo (8 €/tCO₂e). Álvaro-Fuentes et al. (2014) indican que esta práctica tiene a largo plazo un potencial de secuestro de carbono en el suelo.

El laboreo reducido disminuye el daño ambiental hasta los 8 M€, y mejora la renta de los agricultores (+11 M€) y el bienestar de la sociedad (+28 M€) (Cuadro 4.7).

La mayor reducción de emisiones se consigue en comarcas dónde la actividad agrícola es intensa como Monegros (16%), Cinco Villas (12%), Hoya de Huesca (11%) y Zaragoza (5%).

Cuadro 4.7. Resultados de la medida “Laboreo reducido”.

Medida	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	779.058	255	25	230	94	20	1.221	627
Laboreo reducido	779.058	266	8	258	94	20	1.221	211

Rotación de cultivos con leguminosas

La rotación de cultivos con leguminosas reduce la fertilización nitrogenada en 19.000 t N por el nitrógeno en el suelo que fijan las leguminosas. El lixiviado de nitrógeno disminuye a la mitad. Esta práctica reduce las emisiones en 0,4 MtCO₂e (0,3 MtCO₂e por la captura de carbono y 0,1 MtCO₂e por la reducción de fertilizantes) con un coste de -53 €/tCO₂e, y mejora la renta de los agricultores (123 M€, 21%) y el bienestar social (129 M€, 40%), (Cuadro 4.8). Sánchez et al. (2016) indican que la inclusión de leguminosas en el cultivo de trigo y cebada reduce 0,46 MtCO₂e en Aragón con un coste de -343 €/tCO₂e. Sin embargo, la estimación de la rotación de cultivos en Francia arroja un coste

positivo moderado (19 €/tCO₂e), (Pellerin et al., 2017).

Cuadro 4.8. Resultados de la medida “Rotación de cultivos con leguminosas”.

Medida	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	557.811	102	10	92	37	4	0	262
Rotación de cultivos	557.811	123	-6	129	18	2	0	0

La inclusión de las leguminosas en la rotación con otros cultivos permite reducir la totalidad del daño ambiental mediante la compensación de las emisiones del óxido nitroso por la captura de carbono, y el daño ambiental se convierte en beneficio ambiental (-6 M€).

La reducción de emisiones con esta medida se concentra sobre todo en Hoya de Huesca (53.000 tCO₂e), Monegros (39.000 tCO₂e), Cinco Villas (37.000 tCO₂e) y Jiloca (30.000 tCO₂e).

Cultivos cubierta

La utilización de cultivos cubierta de invierno con el cultivo del maíz reduce el abonado hasta las 23.000 tN. Las emisiones directas e indirectas disminuyen en 30.000 tCO₂e con un coste-eficiencia negativo de -134 €/tCO₂e. Esta medida mejora un 3% la renta de los agricultores y un 5% el bienestar social (Cuadro 4.9). Sánchez et al. (2016) indican que el cultivo cubierta reduce las emisiones con un coste-eficiencia negativo que varía entre -400 y -650 €/tCO₂e. Por el contrario, Pellerin et al. (2017) estiman que los cultivos cubierta en Francia tienen un coste positivo.

Cuadro 4.9. Resultados de la medida “Cultivos cubierta en el maíz en regadío”.

Medida	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	79.07	111	12	99	30	11	677	305
Cultivos cubierta (herbáceos)	79.07	115	11	104	23	8	677	275

La introducción de cultivos cubierta en Aragón en el maíz en regadío mejora la eficiencia del uso de nitrógeno y reduce las emisiones sin afectar al rendimiento del maíz (Salmerón et al., 2010, 2011).

Los cultivos cubierta en leñosos compensan la totalidad de las emisiones del óxido nitroso mediante la fijación de carbono en el suelo con un coste-eficiencia positivo de 44 €/tCO₂e. Esta medida disminuye la renta de los agricultores hasta los 43 M€ (-14%), con una ligera disminución del bienestar social (-2%) (Cuadro 4.10).

El almendro es el cultivo con mayor reducción de emisiones (74.000 tCO₂e, 47%), seguido del

olivar (46.000, 29%) y viñedo (36.000, 23%).

Cuadro 4.10. Resultados de la medida “Cultivos cubierta con los leñosos”.

Medida	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	120.945	50	1,7	48,3	6	1	0	42
Cultivos cubierta (leñosos)	120.945	43	-4,3	47,3	6	1	0	0

Medidas para la ganadería

Plantas de tratamientos de estiércol

Las plantas de tratamiento de estiércol podrían reducir las emisiones del óxido nitroso hasta las 84.000 tCO₂e con un coste de 138 €/tCO₂e. El coste de reducción es alto porque los costes de inversión en plantas de tratamiento son elevados. Albiac et al. (2017) señalan que las plantas de tratamiento en España podrían reducir las emisiones en 1,4 MtCO₂e con un coste de 200 €/tCO₂e.

Las plantas de tratamiento de estiércol son necesarias cuando se generan grandes cantidades de estiércol que no pueden reutilizarse en la zona. En caso contrario, es preferible cerrar el ciclo de nitrógeno entre el estiércol de la ganadería y la producción de cultivos para reducir las emisiones.

Cambio en la dieta de los animales: adición de lípidos

La adición de lípidos en la dieta reduce las emisiones de la fermentación entérica de 53.000 tCO₂e para el bovino con un coste de 536 €/tCO₂e, y en 57.000 tCO₂e para el ovino con un coste de 2.768 €/tCO₂e. Los costes son muy altos debido al coste elevado de los aditivos. Esta medida provoca una fuerte caída en la renta de los ganaderos de ovino y bovino, que entrarían en pérdidas (Cuadro 4.11). Wang et al. (2014) señalan que la adición de lípidos reduce las emisiones de la fermentación entérica un 4% en ovino y un 7% en bovino con un coste aproximado de 254 €/tCO₂e.

Esta medida disminuye el daño ambiental en 2 M€ tanto en bovino como en ovino. La adición de lípidos provoca pérdidas importantes de renta de los ganaderos y de bienestar social, lo que indica que esta medida no es eficiente.

Cuadro 4.11. Resultados de la medida “Adición de lípidos en la dieta”.

Adición de lípidos en la dieta	Ovino		Bovino	
	Base	Con medida	Base	Con medida
Número de animales	1.799.934	1.799.934	320.868	320.868
Emisiones de la fermentación entérica (10 ³ tCO ₂ e)	358	300	329	276
Renta (M€)	5	-163	22	-6
Daño ambiental (M€)	14	12	13	11
Bienestar (M€)	-9	-156	9	-17

Reducción de proteína en la dieta del Porcino

La reducción de proteína en la dieta del porcino tiene un potencial de mitigación de 0,1 tCO₂e/animal/año con un coste de -12,8 €/tCO₂e. Esta medida aumenta ligeramente la renta de los ganaderos hasta los 2.026 M€ (0,3%) y el bienestar social hasta los 1.972 M€ (2%), (Cuadro 4.12).

Cuadro 4.12. Resultados de la medida “Reducción de proteína en la dieta de porcino”.

Medida	Número de animales	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Emisiones (10 ³ tCO ₂ e)
Base	6.308.979	2.019	76	1.934	1.891
Reducción de proteína en la dieta del porcino	6.308.979	2.026	54	1.972	1.347

Medida forestalManejo forestal orientado a captura de carbono

La gestión forestal orientada a la captura de carbono se ha planteado para los bosques de pino silvestre y de pino carrasco. Esta gestión permite aumentar la fijación de carbono en 0,66 MtCO₂e con un coste-eficiencia de - 152 €/tCO₂. El coste es negativo porque aumentan los ingresos del aprovechamiento forestal de la madera. El tratamiento silvícola del pino silvestre permite capturar 333.000 tCO₂e adicionales con un coste-eficiencia negativo de -1618 €/tCO₂e. El tratamiento silvícola del pino carrasco permite capturar 330.000 tCO₂e adicionales con un coste-eficiencia positivo de 1325 €/tCO₂e. Esta diferencia de coste-eficiencia es consecuencia de los mayores ingresos por la venta de la madera del pino silvestre. La venta de madera del pino silvestre se realiza en cada clara mientras que la venta de madera del pino carrasco solo se realiza en la corta final. Albiac et al. (2017) muestran que la gestión forestal en España podría capturar 7 MtCO₂e adicionales con un coste-eficiencia cercano a cero. La razón es que la gestión orientada a la captura de carbono no aumenta los costes de tratamiento del manejo forestal actual y estos costes podrían disminuir en algunos casos.

La captura de carbono es importante en la parte norte de la región aragonesa dónde se localiza el 54% de la superficie de pino silvestre, especialmente en la Jacetania, Alto Gállego, Sobrarbe, y La

Ribagorza.

El potencial de reducción de emisiones en Aragón podría alcanzar los 3,2 MtCO₂e, lo que supone el 77% de las emisiones del sector agrario, mediante la adopción completa de las distintas prácticas.

Las medidas de mitigación con valores de coste-eficiencia negativos que proporcionan beneficios en lugar de costes podrían reducir las emisiones en 2,65 MtCO₂e al año. Esta reducción representa el 64% de las emisiones agrarias, y se trata de soluciones Win-Win que reducen los costes privados y los daños sociales. Los resultados muestran que estas prácticas más eficientes consisten en el cambio del manejo forestal, los cultivos cubierta para los herbáceos, el ajuste de la cantidad de fertilizantes nitrogenadas, la rotación de cultivos con leguminosas, la fertilización orgánica en lugar de la mineral, la reducción del laboreo, y la reducción de proteína en la dieta de porcino. El cambio en el manejo forestal es la medida más eficiente (-152 €/tCO₂e), seguida de los cultivos cubierta para herbáceos (-134 €/tCO₂e), y de la optimización en la fertilización nitrogenada (-130 €/tCO₂e) como muestra la figura 4.3.

Las medidas que tienen un coste-eficiencia positivo son medidas que requieren inversiones o costes adicionales para adquisición de inputs específicos como inhibidores o aditivos para la dieta de los animales. En los resultados del trabajo se observa que los cultivos cubierta para leñosos, los inhibidores de nitrificación, las plantas de tratamiento de estiércol, la modernización de los sistemas de riego, y la adición de lípidos en la dieta de bovino y ovino son medidas que tienen costes elevados, por encima del coste social del carbono. La aplicación de estas prácticas permitiría reducir las emisiones en 0,56 MtCO₂e.

Las medidas que tienen costes más elevados son la adición de lípidos en la dieta del bovino (536 €/tCO₂e) y ovino (2768 €/tCO₂e), la modernización del sistema de riego (184 €/tCO₂e), y las plantas de tratamiento de estiércol (138 €/tCO₂e).

El beneficio ambiental podría alcanzar los 128 M€ en Aragón, mediante la adopción del conjunto de prácticas agrarias. Las medidas ganaderas suponen una reducción del 23% de las emisiones GEI, mientras que las medidas agrícolas suponen una reducción del 56%, y la medida forestal una reducción (captura) del 21% de las emisiones.

Las medidas que tienen un potencial de reducción elevado y un beneficio ambiental importante son el cambio del manejo forestal (0,66 MtCO₂e), la disminución de proteína en la dieta del porcino (0,54 MtCO₂e) entre las medidas ganaderas, y el laboreo reducido (0,41 MtCO₂e), la rotación de cultivos (0,39MtCO₂e), la fertilización orgánica que sustituya a la fertilización mineral (0,31 MtCO₂e) y la limitación de la fertilización nitrogenada (0,29 MtCO₂e) entre las medidas agrícolas. Sánchez et al.

(2016) señalan que la rotación de cultivos (0,46 MtCO₂e), la optimización de la fertilización nitrogenada (0,3 MtCO₂e), y el laboreo reducido (0,2 MtCO₂e) son las medidas que tienen un mayor potencial de reducción. Mientras que MacLeod et al. (2010) indican que las medidas que tienen mayor potencial de reducción en el Reino Unido son la mejora del drenaje de la tierra (1,74 MtCO₂e), la mejora en el manejo de la aplicación del nitrógeno (1,15 MtCO₂e) y la mejora en el manejo de estiércol (1 MtCO₂e). En Francia, Pellerin et al. (2017) señalan que la metanización y el laboreo reducido son las medidas más eficientes en términos de reducción de emisiones.

Las medidas que mejoran la fertilidad y la calidad microbiana del suelo y aumentan el secuestro de carbono contribuyen a reducir las emisiones en un 52% con unos costes negativos o muy bajos. Las medidas de manejo de la fertilización nitrogenada reducen en un 39% las emisiones. Estas medidas tienen varias consecuencias ambientales, no solo reducir las emisiones GEI, sino también preservar la calidad del agua y del aire.

La mejor combinación de medidas para reducir las emisiones GEI del sector agrario en Aragón consisten en limitar la fertilización mineral a las necesidades de los cultivos, sustituir la fertilización mineral por la orgánica, laboreo mínimo, rotación de cultivos con leguminosas, cultivos cubierta para los herbáceos, disminuir la proteína en la dieta del porcino y cambiar el manejo forestal. Estas medidas maximizan el beneficio social hasta alcanzar los 299 M€.

Las medidas de mitigación brindan otros beneficios ambientales adicionales para la sociedad, como la eliminación de nutrientes que contaminan los cursos de agua, la reducción de las emisiones de amoníaco a la atmósfera, y la mejora de la biodiversidad.

La rentabilidad y el bienestar social que proporciona cada medida se analizan a continuación.

Cuadro 4.13. El análisis coste-beneficio y la tasa de reducción de las medidas de mitigación de las emisiones GEI.

Medidas sin interacción	Tasa de reducción	Coste Eficiencia	Potencial de reducción	Coste privado	Beneficio ambiental	Beneficio social
Cultivos	tCO₂e/ha/año	€/tCO₂e	tCO₂e	M€	M€	M€
Cultivos cubierta para herbáceos	0,39	-134	30.548	-4	1	5
Ajuste de la fertilización nitrogenada	0,28	-130	294.176	-38	12	50
Rotación de cultivos con leguminosas	0,70	-53	392.960	-21	16	36
Sustitución de la fertilización mineral por orgánica	0,30	-35	314.775	-11	13	24
Laboreo reducido	0,53	-27	414.528	-11	17	28
Cultivos cubierta para leñosos	1,29	44	156.019	7	6	-1
Inhibidores de nitrificación	0,40	74	109.043	8	4	-4
Modernización del sistema de riego	0,50	184	99.457	18	4	-14
Ganadería	tCO₂e/animal/año	€/tCO₂e	tCO₂e	M€	M€	M€
Reducción de proteína en la dieta del Porcino	0,10	-12,8	543.462	-7	22	29
Plantas de tratamientos de estiércol ¹²	-	138	83.726	12	3	-9
Adición de lípidos en dieta de bovino	0,16	536	52.659	28	2	-26
Adición de lípidos en dieta de ovino	0,03	2.768	57.229	158	2	-156
Forestal	tCO₂e/ha/año	€/tCO₂e	tCO₂e	M€	M€	M€
Manejo forestal orientado a la captura de carbono	1,27	- 152	662.941	-101	26	127

¹² Las plantas de tratamientos de estiércol no tienen una tasa de reducción por hectárea o animal porque se implementan en cada región en función de la cantidad disponible de estiércol.

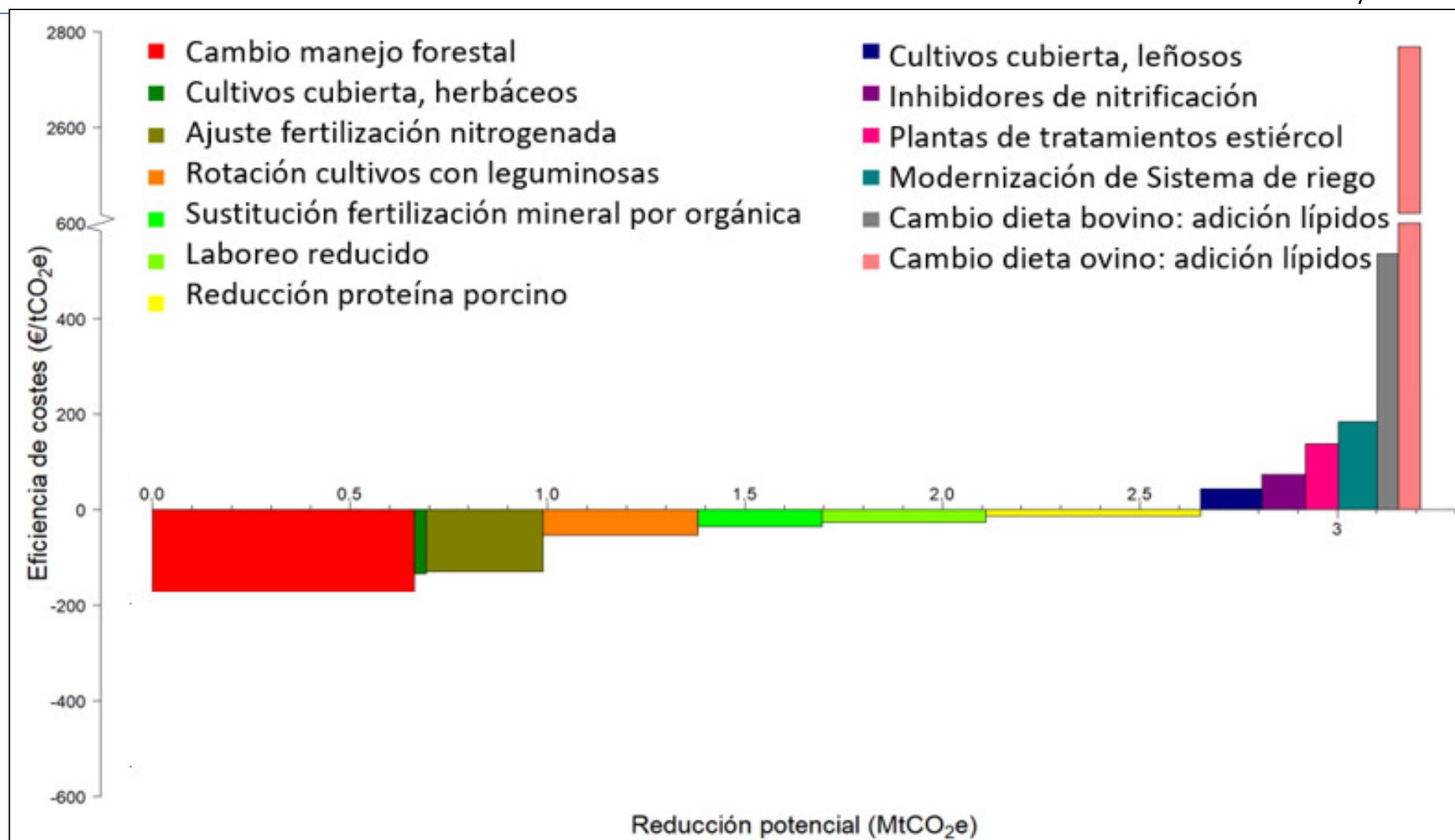


Figura 4.3. MACC de las medidas de mitigación de las emisiones GEI.

4.2.2. El potencial de mitigación de las medidas teniendo en cuenta la interacción entre medidas

Tras del análisis del potencial de mitigación de las medidas de forma individual, en esta sección se analiza el potencial de reducción de estas medidas de forma conjunta teniendo en cuenta la interacción entre las medidas. El procedimiento plantea una secuencia de aplicación de las medidas para los cultivos, y una secuencia de medidas para la ganadería. Estas secuencias del orden de aplicación de las medidas se basan en los resultados del análisis coste-beneficio de cada medida de forma individual, la importancia de la medida y su aplicabilidad en la región.

La secuencia del orden de aplicación de las medidas para los cultivos es la siguiente: M1. Ajuste de la cantidad de fertilizante nitrogenado; M2. Sustitución de la fertilización mineral por fertilización orgánica (estiércol); M3. Laboreo reducido; M4. Cultivos cubierta para herbáceos; M5. Rotación de cultivos con leguminosas; M6. Cultivos cubierta para leñosos; M7. Inhibidores de nitrificación; y M8. Modernización del sistema de riego.

El coste-eficiencia, la tasa de reducción, y el potencial de reducción de las medidas dependen de cómo se aplican las medidas ya que los resultados son distintos si se aplica una medida individual, o se aplica una combinación de medidas. Cuanto mayor es el número de medidas, mayor es la interacción de una medida adicional con las medidas ya implantadas. Esta interacción modifica el potencial de reducción y los costes que tiene la medida si se aplica de forma individual.

En la mayoría de los casos, la interacción reduce la magnitud de la reducción de cada medida adicional, por lo que disminuye la eficiencia de costes. Esto se observa claramente en las últimas medidas que se aplican, que son las que tienen un coste-eficiencia positivo mayor (son las más costosas). El cuadro 4.14 muestra la diferencia en coste-eficiencia entre las medidas analizadas individualmente y las medidas combinadas en las que hay interacción. El coste-eficiencia de las medidas combinadas cambia por las interacciones múltiples (MacLeod et al., 2010). Esta variación significativa de coste-eficiencia se observa en las siguientes medidas: cultivos cubierta para herbáceos, inhibidores de nitrificación y modernización del regadío. En algunas medidas la tasa de reducción y el coste-eficiencia no cambian debido a la ausencia de interacciones con medidas anteriores.

Dadas las grandes discrepancias entre la aplicación individual y combinada de algunas medidas, es necesario tener en cuenta las interacciones en la elaboración de la curva MACC.

Cuadro 4.14. Comparación entre el coste eficiencia y la tasa de reducción de las medidas analizadas individualmente y en combinación.

Medidas	Sin interacción		Con interacción	
	Tasa de reducción (tCO ₂ e/ha/año)	Coste-eficiencia (€/tCO ₂ e)	Tasa de reducción (tCO ₂ e/ha/año)	Coste-eficiencia (€/tCO ₂ e)
Ajuste de la fertilización nitrogenada	0.28	-130	0.28	-130
Sustitución de la fertilización mineral por orgánica	0,3	-35	0,21	-34
Laboreo reducido	0.53	-27	0.5	-28
Cultivos cubierta para herbáceos	0,39	-134	0,21	68
Rotación de cultivos con leguminosas	0,7	-53	0,57	-30
Cultivos cubierta para leñosos	1,29	44	1,29	44
Inhibidores de nitrificación	0,4	74	0.17	182
Modernización del sistema de riego	0.5	184	0.24	470
Ganadería	(tCO₂e/animal/año)	(€/tCO₂e)	(tCO₂e/animal/año)	(€/tCO₂e)
Reducción de proteína en la dieta del Porcino	0,1	-12,8	0,1	-12,8
Plantas de tratamientos de estiércol		138		134
Adición de lípidos en dieta de bovino	0,16	536	0.16	536
Adición de lípidos en dieta de ovino	0,03	2768	0.03	2768

Medidas para los cultivos

Ajuste de la fertilización nitrogenada

La reducción de los fertilizantes nitrogenados es una medida importante en la mitigación de las emisiones GEI. El grado de aplicabilidad de esta práctica es relativamente elevado ya que reduce los costes y aumenta la renta de los agricultores, y mejora el bienestar de la sociedad. Por ello, esta medida se selecciona como la primera medida a tomar en la secuencia de medidas.

El ajuste de la fertilización a las necesidades de los cultivos como se ha señalado anteriormente tiene un potencial de reducción de 0,29 MtCO₂e con un coste-eficiencia de -130 €/tCO₂e.

Sustitución de la fertilización mineral por orgánica (estiércol)

El aumento del porcentaje de fertilización orgánica desde el 27% hasta el 60% es una alternativa interesante para reducir las emisiones de óxido nítrico. Esta medida tiene viabilidad en muchas zonas donde hay concentraciones de ganadería y amplia superficie de cultivos, en especial en regadío. Además, esta alternativa reduce los costes y mejora la renta de los agricultores. Por ello, la sustitución de fertilización mineral por orgánica se selecciona como segunda medida a tomar en la secuencia de medidas.

La medida reduce el abonado mineral (25.000 tN, 22%) por lo que las emisiones directas e indirectas caen en 218.000 tCO₂, con un coste-eficiencia de -34 €/tCO₂e. La reducción de emisiones de esta medida tomada de forma individual sería 315.000 tCO₂, mucho mayor que si la medida se toma en secuencia tras la medida anterior “ajuste de la fertilización mineral”.

En esta medida, el daño ambiental se reduce a 29 M€ y mientras que la renta de los agricultores y el bienestar social suben a 491 y 462 M€, respectivamente (Cuadro 4.15).

Cuadro 4.15. Resultados de la medida “Sustitución de la fertilización mineral por orgánica (estiércol)”.

Medida con interacción	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	1.035.653	484	38	446	113	25	2.224	949
Sustitución de la fertilización mineral por orgánica	1.035.653	491	29	462	88	19	2.224	731

Reducción del laboreo

La reducción del laboreo disminuye las emisiones a 234.000 tCO₂e con un coste-eficiencia de -28 €/tCO₂e. Esta medida mejora la renta de los agricultores (266 M€, +4%) y el bienestar de la sociedad (257 M€, +12%), (Cuadro 4.16).

La tasa de reducción de la medida sin y con interacción varía ligeramente de 0,53 a 0,5 tCO₂e/ha/año. Esta baja variabilidad se explica por el valor constante del secuestro de carbono considerado en los dos casos dada la falta de información técnica y la complejidad de estimar el secuestro de carbono de las distintas técnicas de forma conjunta.

Cuadro 4.16. Resultados de la medida “Laboreo reducido”.

Medida con interacción	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	779.058	255	25	230	94	20	1.221	627
Laboreo reducido	779.058	266	9	257	94	20	1.221	234

Cultivos cubierta

Los cultivos cubierta en el cultivo de maíz en regadío reducen la fertilización mineral en un 13%, lo que disminuye las emisiones las emisiones directas e indirectas de óxido de nitrógeno a 289.000 tCO₂e, con un coste-eficiencia positivo de 68 €/tCO₂e. La renta de los agricultores cae 1 M€ por el mayor coste de siembra, mientras que el beneficio social se mantiene estable (99 M€), (Cuadro 4.17).

La reducción de emisiones de esta medida con interacción es inferior en un 46% a la reducción que se obtiene si la medida se toma de forma individual.

Los cultivos cubierta en leñosos no tienen interacción con las medidas anteriores, su potencial de reducción calculado en la sección anterior es 156.000 tCO₂e con un coste-eficiencia de 44 €/tCO₂e.

Cuadro 4.17. Resultados de la medida “Cultivos cubierta en el maíz en regadío”.

Medida con interacción	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	79.07	111	12	99	30	11	677	305
Cultivos cubierta	79.07	110	11	99	26	10	677	289

Rotación de cultivos con leguminosas

La rotación de cultivos reduce el abonado y el lixiviado, lo que disminuye las emisiones directas e indirectas de óxido nitrógeno con un coste negativo de -30 €/tCO₂e. Al considerar la interacción, la reducción de emisiones es un 20% menor que si la medida de rotación de cultivos se toma de forma

individual. Bajo esta medida, el potencial de reducción de emisiones cae un 20% en comparación de su reducción cuando se aplica de forma individual.

La renta de los agricultores y el beneficio social aumentarán 8% (9 M€) y 23% (21 M€), respectivamente (Cuadro 4.18).

Cuadro 4.18. Resultados de la medida “Rotación de cultivos con leguminosas”.

Medida con interacción	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	557.811	102	10	92	37	4	0	262
Rotación de cultivos	557.811	111	-2	113	30	3	0	0

Inhibidores de nitrificación

Los inhibidores de nitrificación son menos eficientes para reducir emisiones cuando las medidas se toman con interacción. La reducción con interacción es el 60% de la reducción conseguida cuando los inhibidores de nitrificación se aplican de forma individual.

Bajo esta medida, las emisiones directas e indirectas se reducen a 318.000 tCO₂e, con un coste-eficiencia elevado de 182 €/tCO₂e. Esta medida reduce la renta de los agricultores a 148 M€ y el beneficio social a el 13 M€ (Cuadro 4.19).

Cuadro 4.19. Resultados de la medida “Inhibidores de nitrificación”.

Medida con interacción	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	260.321	156	15	141	38	12	677	363
Inhibidores de nitrificación	260.321	148	13	135	38	12	677	318

Modernización del sistema de riego

La modernización del sistema de riego proporciona una reducción de emisiones de óxido nitroso que acerca de 49.000 tCO₂e con un coste-eficiencia elevado de 470 €/tCO₂e. La reducción de emisiones es consecuencia de la reducción del abonado y del lixiviado (67.000 y 18.000 tN, respectivamente). Para esta medida con interacción, la reducción de emisiones es la mitad de lo que se consigue con la medida tomada de forma individual.

La medida reduce la renta de los agricultores y el beneficio social, ya que los costes de modernización son muy elevados (Cuadro 4.20).

Cuadro 4.20. Resultados de la medida "Modernización del sistema de riego".

Medida con interacción	Superficie (ha)	Renta (M€)	Daño ambiental (M€)	Bienestar (M€)	Abonado (10 ³ Tm)	Lixiviado (10 ³ Tm)	Agua de riego (hm ³)	Emisiones N ₂ O (10 ³ tCO ₂ e)
Base	356.897	332	26	306	70	21	2.224	645
Modernización de regadío	206.844	309	24	285	67	19	1.883	596

Medidas para la ganadería

Reducción de proteína en la dieta del porcino

La reducción de la cantidad de proteína en la dieta de porcino se selecciona como la primera medida en ganadería, por la importancia del sector porcino y porque la medida tiene un coste-eficiencia negativo. Como se ha señalado en la sección anterior, la reducción de proteína en la dieta del porcino disminuye las emisiones en 543.000 tCO₂e con un coste de -12,8 €/tCO₂e.

Plantas de tratamientos de estiércol

La construcción de plantas de tratamiento de estiércol depende de la disponibilidad de estiércol en cada comarca, una vez que se tiene en cuenta la aplicación de estiércol como fertilizante orgánico y la reducción de proteína en la dieta del porcino. Las comarcas que no tienen suficiente disponibilidad de estiércol para construir plantas de tratamiento son Alto Gallego, Andorra, Aranda, Campo de Cariñena, y Sierra de Albarracín.

Las plantas de tratamiento reducen a 73.000 tCO₂e, con un coste-eficiencia de 134 €/tCO₂e.

Adición de lípidos en la dieta de los animales

Los resultados de la adición de lípidos en la dieta del bovino y ovino no varían respecto a los resultados de la sección anterior, ya que no hay interacción entre la adición de lípidos y las demás medidas.

El potencial de reducción de emisiones anual en Aragón si se toman las medidas conjuntamente podría alcanzar los 2,9 MtCO₂e, que supone cerca 70% de las emisiones del sector (Cuadro 4.21). La reducción de emisiones cae un 10% en comparación con el potencial de reducción de las medidas analizadas de forma individual.

Las medidas que tienen un potencial de reducción Win-Win son el cambio en el manejo forestal, la reducción de la fertilización, la sustitución de la fertilización mineral por orgánica, la reducción de laboreo, la rotación de cultivos, y la reducción de proteína en la dieta del porcino. Con estas medidas las emisiones se reducen en un 60% hasta los 1,6 MtCO₂e (Figura 4.4).

Las medidas que no son Win-Win tienen un coste-eficiencia positivo. Todas estas medidas tienen un coste-eficiencia mayor que el coste social de carbono, por lo que no deben implementarse ya que

reducen el bienestar social. La reducción de emisiones que se obtendría con estas medidas es 0,4 MtCO₂e.

El beneficio ambiental de las medidas con interacción podría alcanzar los 115 M€ en Aragón, al implantar estas prácticas agrarias. Este beneficio es menor en 10% a la suma de los beneficios de las medidas tomadas individualmente. Las medidas que tienen un mayor potencial de reducción y un beneficio ambiental elevado son la reducción de proteína en la dieta del porcino (0,54 MtCO₂e) en medidas ganaderas, y el laboreo reducido (0,39 MtCO₂e), rotación de cultivos (0,32 MtCO₂e), fertilización orgánica (0,22 MtCO₂e), y ajuste en la fertilización nitrogenada (0,29 MtCO₂e) en medidas agrícolas.

Las medidas que aumentan el secuestro de carbono son por orden de importancia la gestión forestal, laboreo reducido, rotación de cultivos y cultivos cubierta. Estas medidas capturan 1,5 MtCO₂e. La captura de carbono de estas medidas cae un 7% en comparación con las medidas individuales. Las medidas que reducen las emisiones de óxido nitroso son por orden de importancia la rotación de cultivos, ajuste de fertilizantes, sustitución de abonado mineral por orgánico, modernización de regadío, y cultivos cubierta. Estas medidas reducen las emisiones en los 0,9 MtCO₂e, aunque la reducción de emisiones es un 28% menor en comparación con las medidas individuales.

El mejor conjunto de medidas para reducir las emisiones GEI del sector agrario consiste en combinar el ajuste de fertilización nitrogenada, sustitución de fertilización mineral por orgánica, el laboreo mínimo, la rotación de cultivos con leguminosas, los cultivos cubierta en herbáceos, la reducción de proteína en la dieta del porcino, y la gestión forestal orientada a la captura de carbono. Estas medidas maximizan el bienestar social hasta los 259 M€. El bienestar social que se alcanza teniendo en cuenta la interacción entre medidas es menor que la suma de bienestar social de las medidas individuales.

Cuadro 4.21. El análisis coste beneficio y la tasa de reducción de las medidas de mitigación con interacciones.

Medidas con interacción	Tasa de reducción	Coste Eficiencia	Potencial de reducción	Coste privado	Beneficio ambiental	Beneficio social
Cultivos	tCO₂e/ha/año	€/tCO₂e	tCO₂e	M€	M€	M€
Ajuste de la fertilización nitrogenada	0,28	-130	294.176	-38	12	50
Sustitución de la fertilización mineral por orgánica	0,21	-34	217.697	-7	9	16
Rotación de cultivos con leguminosas	0,57	-30	315.723	-9	13	22
Laboreo reducido	0,5	-28	393.411	-11	16	27
Cultivos cubierta para leñosos	1,29	44	156.019	7	6	-1
Cultivos cubierta para herbáceos	0,21	68	16.564	-1	1	2
Inhibidores de nitrificación	0,17	182	44.723	8	2	-6
Modernización del sistema de riego	0,2	470	48.792	23	2	-21
Ganadería	tCO₂e/animal/año	€/tCO₂e	tCO₂e	M€	M€	M€
Reducción de proteína en la dieta del Porcino	0,1	-12.8	543.462	7	22	15
Plantas de tratamientos de estiércol ¹³	-	134	73.260	10	3	-7
Adición de lípidos en dieta de bovino	0,16	536	52.659	28	2	-26
Adición de lípidos en dieta de ovino	0,03	2.768	57.229	158	2	-156
Forestal	tCO₂e/ha/año	€/tCO₂e	tCO₂e	M€	M€	M€
Manejo forestal orientado a la captura de carbono	1,27	-152	662.941	-101	26	127

¹³ Las plantas de tratamientos de estiércol no tienen una tasa de reducción por hectárea o animal porque se implementan en cada región en función de la cantidad disponible de estiércol.

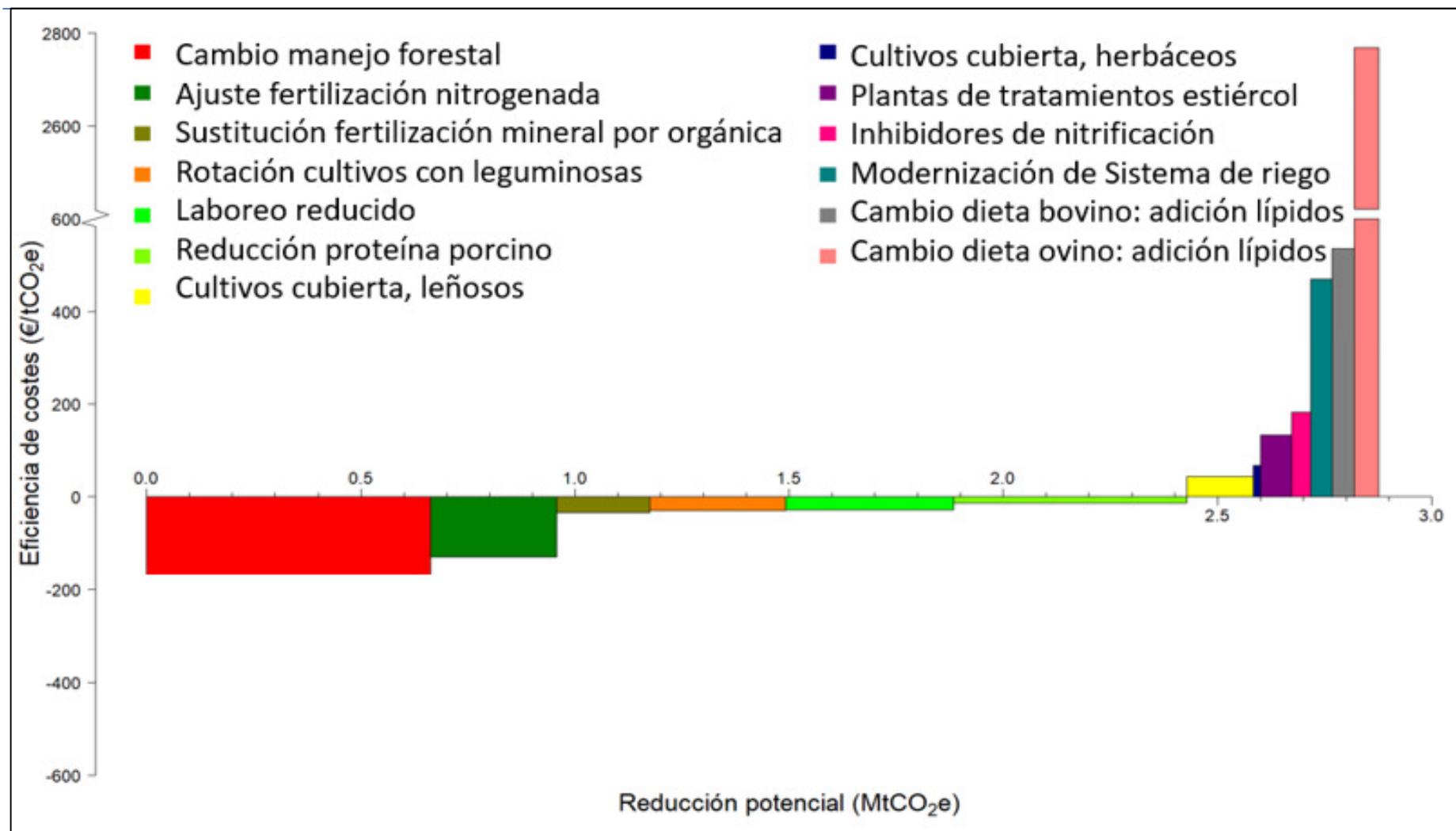


Figura 4.4. MACC de las medidas de mitigación con interacciones.

4.3. Análisis de sensibilidad del beneficio social bajo diferentes niveles de coste social del carbono

El análisis de sensibilidad de los beneficios sociales de las medidas de mitigación ante distintos valores del coste social de carbono se ha llevado a cabo para unos costes sociales de carbono de 20 y 80 €/tCO_{2e}. Para un coste de 20 €/tCO_{2e} los resultados no cambian. Para un coste social de carbono de 80 €/tCO_{2e}, el potencial de mitigación aumenta, ya que pueden implementarse medidas adicionales de mitigación cuyo coste-eficiencia es inferior a 80 €/tCO_{2e} por lo que cubren sus costes de implementación. El resto de las medidas tienen un coste-eficiencia superior a 80 €/tCO_{2e}, y su implantación requería valores mucho más elevados del coste social de carbono (Cuadro 4.22).

Cuando las medidas se toman de forma individual, el potencial de mitigación sigue siendo 2,64 MtCO_{2e} para el coste social de 20 €/tCO_{2e} y las medidas a implementar son ajuste de la fertilización, sustitución de la fertilización mineral por orgánica, cultivos cubierta para herbáceos, laboreo mínimo, rotación de los cultivos con leguminosas, reducción de proteína en la dieta de porcino y cambio en el manejo forestal. Cuando el coste social del carbono es 80 €/tCO_{2e}, la reducción de emisiones aumenta 0,3 MtCO_{2e}. En este caso las medidas adicionales que se implantan son inhibidores de nitrificación y los cultivos cubierta en leñosos. Cuando se tiene en cuenta la interacción entre medidas, el potencial de mitigación no cambia para el coste social del carbono de 20 €/tCO_{2e}. Para el coste social del carbono de 80 €/tCO_{2e}, la reducción de emisiones aumenta en 0,2 MtCO_{2e}. ya que se implementa la medida adicional de cultivos cubierta en leñosos, que tiene un coste eficiencia inferior a 80 €/tCO_{2e}.

Cuadro 4.22. Análisis de sensibilidad del beneficio social bajo diferentes costes de carbono.

Medidas con interacción	Sin interacción				Con interacción			
	Potencial de reducción (MtCO _{2e})	Beneficio Social (M€) Con un coste de carbono de:			Potencial de reducción (MtCO _{2e})	Beneficio Social (M€) Con un coste de carbono de:		
		20 €/tCO _{2e}	40 €/tCO _{2e}	80 €/tCO _{2e}		20 €/tCO _{2e}	40 €/tCO _{2e}	80 €/tCO _{2e}
Cultivos								
Ajuste de la fertilización nitrogenada	0,29	44	50	62	0,29	44	50	62
Sustitución de la fertilización mineral por orgánica	0,31	17	24	36	0,22	12	16	25
Laboreo reducido	0,41	19	28	44	0,39	19	27	43
Cultivos cubierta para herbáceos	0,03	5	5	7	0,02	1	2	2
Rotación de cultivos con leguminosas	0,39	29	36	52	0,32	16	22	35
Cultivos cubierta por leñosos	0,16	-4	-1	6	0,16	-4	-1	6
Inhibidores de nitrificación	0,11	-6	-4	1	0,04	-7	-6	-5
Modernización del sistema de riego	0,10	-19	-17	-13	0,05	-25	-24	-21
Ganadería								
Reducción de proteína en la dieta del Porcino	0,54	18	29	50	0,54	4	15	37
Plantas de tratamientos de estiércol	0,08	-99	-98	-94	0,07	-8	-7	-4
Adición de lípidos en dieta de bovino	0,05	-27	-26	-24	0,05	-27	-26	-24
Adición de lípidos en dieta de ovino	0,06	-157	-156	-154	0,06	-157	-156	-154
Forestal						0		0
Manejo forestal orientado a la captura de carbono	0,66	114	127	154	0,66	114	127	154

4.4. Escenarios de políticas de mitigación de emisiones agrícolas

Las proyecciones de cambio del uso de tierra en Aragón en el horizonte 2050 suponen una reducción del regadío y un aumento del secano por la caída de la disponibilidad del agua en la región. La predicción que se asume es una caída de la superficie de regadío en 36.000 hectáreas que pasan a ser cultivos en secano, y que afectan al trigo y la cebada al ser los cultivos menos rentables en regadío. En 2050, la superficie de regadío disminuiría a 320.000 ha y la superficie de secano aumentaría a 714.000 ha. La predicción para el porcino es un aumento de la cabaña porcina hasta los 10 millones de cabezas en 2050.

Estas proyecciones futuras del sector agrario tienen una gran incertidumbre tanto en lo que refiera al uso de tierra como a la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios por los impactos del cambio climático.

En un mundo globalizado, la mitigación y adaptación al cambio climático requiere de la coordinación entre países y sectores que garantice la seguridad alimentaria de las poblaciones humanas. Por ello se estiman diferentes trayectorias de emisiones GEI según el grado de coordinación de los esfuerzos entre países, lo que supone llegar a acuerdos para implementar un mayor o menor número de medidas en 2050.

Las emisiones GEI alcanzarán los 5,2 MtCO₂e en el escenario continuista BAU (S1). Estas emisiones alcanzarán los 4,2 MtCO₂e bajo el escenario de implementación de las medidas más viables y eficientes (S2), y los 1,7 MtCO₂e bajo el escenario de implementación de todas las medidas (S3) (Figura 4.5).

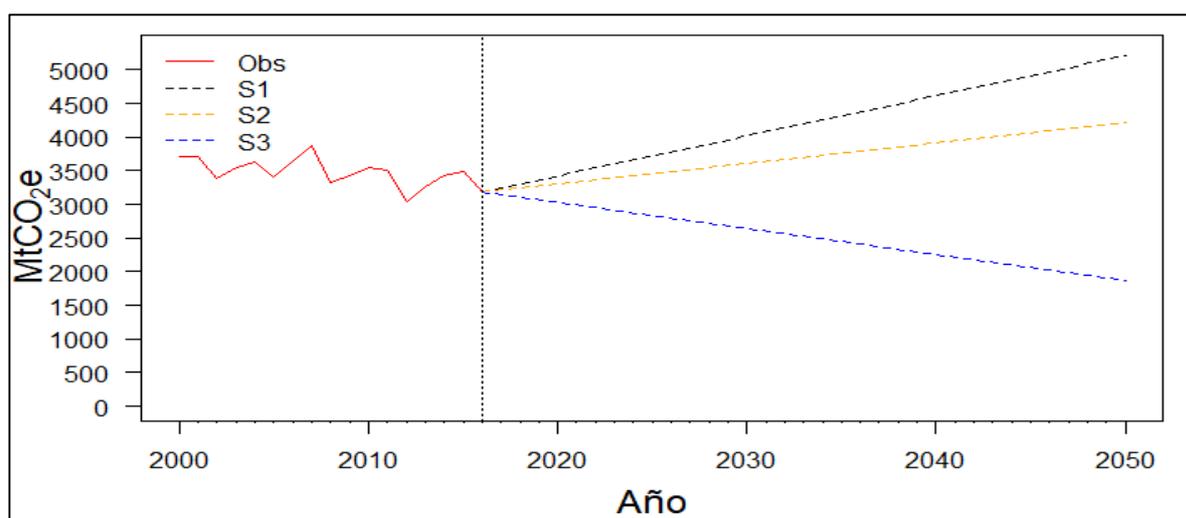


Figura 4.5. Las emisiones GEI en 2050 bajo los escenarios de políticas de mitigación.

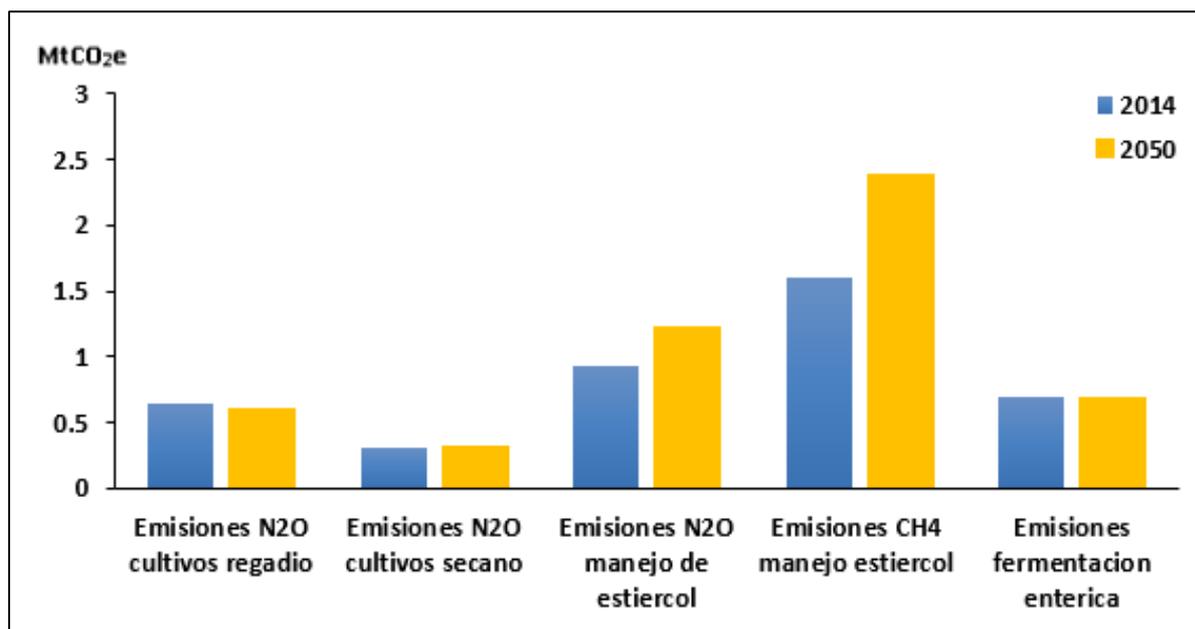


Figura 4.6. Las emisiones GEI en 2014 y 2050.

En el escenario continuista (S1), las emisiones GEI del sector agrario aumentarían un 26% en los próximos 30 años, respecto a 2014. Este incremento sería consecuencia del aumento de las emisiones de los cultivos en seco (6%), y las emisiones de óxido nitroso y metano del estiércol (44%), (Figura 4.6).

Las emisiones en el segundo escenario de implementación de las medidas más viables y eficientes (S2) disminuirían en 1 MtCO₂e (19%) en 2050 con un beneficio de 60 M€. El ajuste de la fertilización nitrogenada consigue una reducción de 0,3 MtCO₂e, la sustitución con fertilización orgánica consigue una reducción de 0,3 MtCO₂e, y el laboreo mínimo y la siembra directa consiguen una reducción de 0,4 MtCO₂e. La implementación de estas tres medidas permite estabilizar las emisiones GEI durante el periodo 2014 a 2050.

Este objetivo de estabilización de las emisiones GEI no es una alternativa muy ambiciosa para poder combatir la grave amenaza del cambio climático, conservar los recursos naturales, y proteger el medio ambiente.

El tercer escenario (S3) es el más ambicioso porque se implementan todas las medidas disponibles, con una reducción significativa de las emisiones GEI de 3,5 MtCO₂e con un coste de 31 M€. La medida de gestión forestal para capturar carbono es la que genera un mayor efecto por la fijación de carbono (0,66 MtCO₂e), seguida por la reducción de proteína en la dieta del porcino (0,6 MtCO₂e), la rotación de cultivos (0,4 MtCO₂e), la sustitución de fertilización mineral por orgánica (0,4 MtCO₂e), y el laboreo mínimo (0,3 MtCO₂e). Al conseguir reducir las emisiones GEI, este escenario de políticas

es el único que contribuye a una gestión más sostenible del sector primario en Aragón. Para lograr la implementación de todas las medidas es necesaria la cooperación de los agentes implicados que consiga la acción colectiva para asegurar la sostenibilidad del medio ambiente y los recursos naturales (Figura 4.7).

En la implementación de las medidas de mitigación se puede encontrar muchas barreras y limitaciones financieras, agronómicas, y sociales. Por ejemplo, la falta de conocimiento de los agricultores de las mejores técnicas de producción sostenibles, el mantenimiento de prácticas habituales, la falta de confianza en nuevos procedimientos, la falta de incentivos para la introducción de procesos de producción favorables para el medio ambiente y el conjunto de la sociedad, y el surgimiento de instituciones formales e informales que potencien la acción colectiva. Resolver estas limitaciones es la tarea de los responsables de la toma de decisiones públicos y privados.

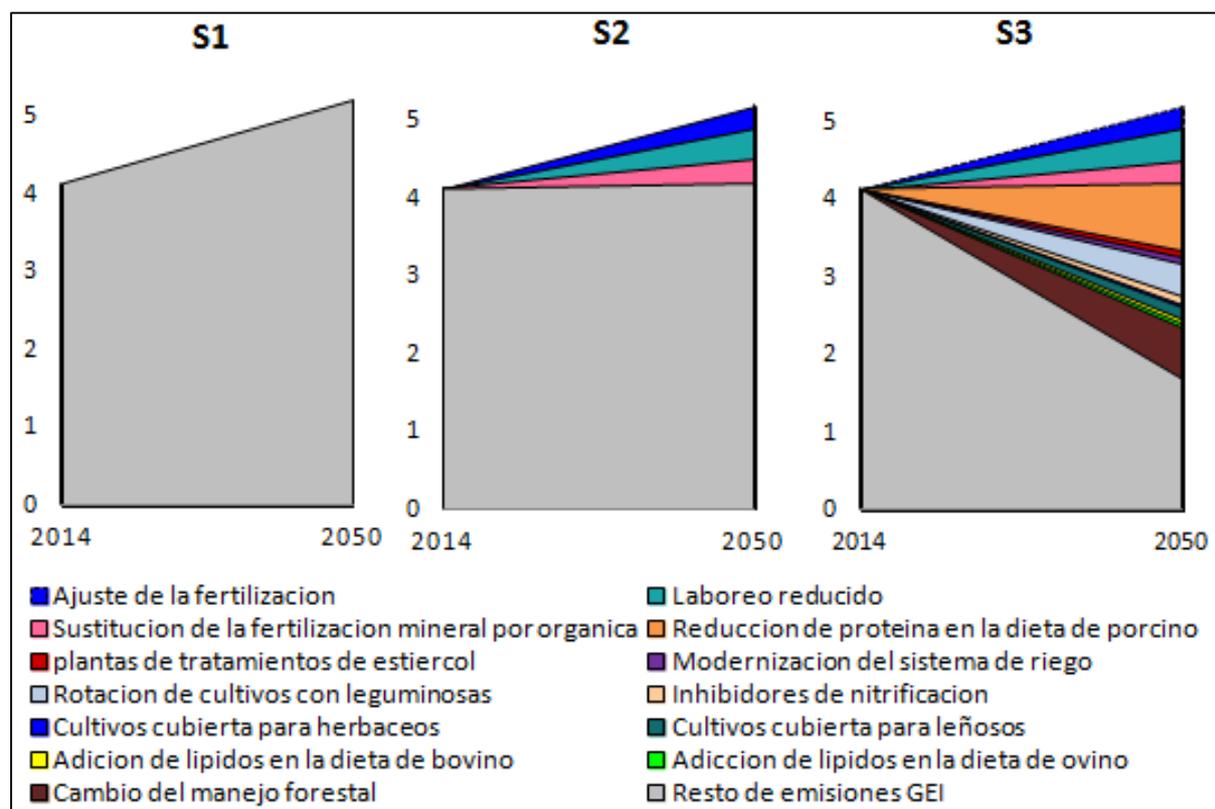


Figura 4.7. La proyección de emisiones GEI en los tres escenarios de políticas (MtCO₂e).



Capítulo 5

CONCLUSIONES

Capítulo 5

CONCLUSIONES

El cambio climático es un problema medioambiental generado por las actividades antropogénicas que provocan el calentamiento global. El cambio climático constituye un gran desafío para la sostenibilidad de la agricultura en las próximas décadas. Este desafío surge en un periodo especialmente crítico, porque la demanda global de alimentos casi se duplicará en 2050 como consecuencia del crecimiento de la población y la renta mundiales.

Muchos estudios muestran que el calentamiento y la mayor variabilidad climática tendrán impactos significativos que amenazarán los sistemas naturales y humanos. La agricultura, la ganadería y los bosques son sectores clave en el estudio del cambio climático porque son la fuente de la alimentación humana, y por su interdependencia con la conservación del medio ambiente y la protección de los ecosistemas naturales. Los efectos negativos del cambio climático sobre estos sectores serán importantes.

Las proyecciones señalan que aumentarán las temperaturas, disminuirán las precipitaciones en las zonas áridas y semiáridas, y aumentará la frecuencia de los eventos extremos (IPCC 2007 y 2014). Además el aumento de emisiones GEI provocará grandes cambios en el sistema climático que amenazan la sostenibilidad de los recursos naturales y los ecosistemas. Estas proyecciones de cambio climático para final de siglo indican que las zonas áridas y semiáridas del sur de Europa soportarán una reducción importante de disponibilidad de agua y un fuerte aumento de las extracciones, pérdidas de producción por la caída de la productividad de los cultivos y la ganadería, y daños significativos sobre los ecosistemas (FAO, 2011). En España, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en 2015 alcanzaban los 336 millones tCO₂e, con un incremento del 15% en comparación con el año 1990 (MAPAMA, 2017a). Las actividades agrícolas y ganaderas mundiales emiten cerca del 10% de la carga de emisiones, y son las principales fuentes de las emisiones GEI que no son de CO₂ (metano CH₄ y óxido nitroso N₂O). En Aragón, las emisiones GEI del sector agrario alcanzan los 3,5 MtCO₂e en 2015, lo que representan el 21% de las emisiones totales de la región y superan el porcentaje del 11% que tienen las emisiones agrarias para el conjunto de España.

El sector agrario es un sector clave en el diseño de políticas de mitigación en comparación con otros sectores económicos, dada su doble funcionalidad como fuente de emisiones GEI pero también como un sector que ofrece oportunidades de bajo coste para mitigar estas emisiones. Este trabajo proporciona una estimación actualizada del balance de emisiones GEI del sector agrario en Aragón y del potencial de mitigación de distintas medidas de mitigación. Las medidas se han analizado de forma

individual y también teniendo en cuenta la interacción entre ellas. Finalmente se ha realizado una proyección del futuro de la agricultura aragonesa, y se han planteado tres escenarios de implementación de las medidas para determinar las consecuencias de los esfuerzos de mitigación. Esta información puede ser útil para orientar las políticas y para elaborar estrategias de mitigación en la región.

La estimación del balance de emisiones GEI del sector agrario en Aragón se lleva a cabo mediante la revisión bibliográfica de trabajos anteriores y la recopilación de información biofísica y económica sobre las actividades agrarias y ganaderas (superficie de cultivos, número de animales, aporte de nitrógeno, fracción lixiviada, rendimiento, uso de agua, y márgenes netos). Esta información se agrega a nivel municipal y comarcal, por tipo de cultivo y especie ganadera, y por sistema de riego. Entre las distintas fuentes de información utilizadas destacan los anuarios estadísticos del Gobierno de Aragón y del MAPAMA, los trabajos de Orus (2006) y Mema (2006), y la información directa proporcionada por la Unidad de Suelos y Riegos del CITA. La estimación de las emisiones GEI se ha realizado con el método Nivel 1 (Tier 1) del IPCC, que consiste en multiplicar los factores de emisión por los datos específicos de la región.

Los resultados del estudio muestran que las emisiones GEI en Aragón alcanzan los 4,1 MtCO₂e, que provienen principalmente de las emisiones de metano y óxido nitroso del manejo de estiércol (2,5 MtCO₂e), seguidas de las emisiones directas e indirectas de óxido nitroso de los cultivos (0,9 MtCO₂e), y las emisiones de metano de la fermentación entérica (0,7 MtCO₂e). Las mayores emisiones GEI se localizan en Monegros (14%), Cinco Villas (11%), la Litera (9%) y Hoya de Huesca (6%) por la concentración de ganado porcino y de cultivos en regadío en estas comarcas.

Los bosques tienen una gran importancia en la mitigación del cambio climático dado su elevado potencial de fijación de carbono, tanto en biomasa aérea como en suelo. Los bosques aragoneses fijan cerca de 3 MtCO₂e y la mayor captura de carbono la realizan los pinares (56%), seguidos de los encinares (18%), y el arbolado claro (8%). La captura de carbono se concentra en las comarcas de Sobrarbe (320.000 tCO₂e), Ribagorza (305.000 tCO₂e), Jacetania (285.000 tCO₂e), Gudar-Jabalambre (277.000 tCO₂e) y Cinco Villas (154.000 tCO₂e). Los beneficios ambientales de la captura de carbono alcanzan los 116 M€, utilizando el coste social del carbono de 40 €/tCO₂e que propone la OCDE.

Este trabajo tiene como objetivo proporcionar información sobre la eficiencia de costes de las medidas de mitigación, que se analizan de forma individual y de forma conjunta teniendo en cuenta la interacción entre las medidas. La finalidad es encontrar la combinación más eficiente de estas medidas de mitigación. El trabajo está basado en la búsqueda de evidencia científica sólida y completa sobre las medidas, y pretende cubrir las dimensiones sociales, ambientales y económicas del problema. Esta

información está dirigida a los grupos de interés del sector agrario y otros sectores, en especial a los responsables de la toma de decisiones públicos y privados.

La evaluación de las distintas medidas de mitigación se realiza mediante el análisis de coste-eficiencia de las medidas, examinando el potencial de reducción de cada medida y sus costes y beneficios. Posteriormente se clasifican las medidas según su coste-eficiencia y se construye la curva de costes de reducción marginales (MACC). Este enfoque permite evaluar y priorizar las distintas prácticas de mitigación, y también determinar las compensaciones y sinergias entre los aspectos económicos y ambientales. Esta herramienta sirve para comparar el potencial de reducción y el coste de las distintas medidas de mitigación. El trabajo analiza el coste-eficiencia de las medidas de mitigación consideradas de forma individual y también teniendo en cuenta las interacciones en ellas, para poder determinar la mejor combinación de medidas.

La selección de las medidas se realiza a partir de la información técnica y del conocimiento de los procesos que se desarrollan en el suelo mediante una revisión bibliográfica y con la información directa proporcionada por expertos de la Unidad de Suelos y Riegos del CITA, del CSIC (Aula Dei), de la Unidad de Recursos Forestales del CITA, y de la Unidad de Producción Animal del CITA. Las medidas consideradas en este trabajo son las siguientes: ajuste de la fertilización nitrogenada, cultivos cubierta, modernización del regadío, inhibidores de nitrificación, sustitución de la fertilización mineral por orgánica, laboreo reducido, rotación de cultivos con leguminosas, reducción de proteína en la dieta del porcino, adición de lípidos en la dieta de los rumiantes, plantas de tratamientos de estiércol, y gestión forestal orientada a la captura de carbono.

El análisis del potencial de mitigación de las medidas examinadas de forma conjunta y teniendo en cuenta la interacción entre ellas es un proceso complejo dada la ausencia de información técnica cuando las medidas se toman conjuntamente. En este trabajo se plantea una secuencia de medidas para los cultivos y una secuencia para la ganadería. El orden de las medidas se establece según la viabilidad que tiene la implementación de cada medida. La secuencia del orden de aplicación de las medidas para los cultivos es la siguiente: M1. Ajuste de la cantidad de fertilizante nitrogenada; M2. Sustitución de la fertilización mineral por orgánica (estiércol); M3. Laboreo reducido; M4. Cultivos cubierta para herbáceos; M5. Rotación de cultivos con leguminosas; M6. Cultivos cubierta para leñosos; M7. Inhibidores de nitrificación; y M8. Modernización del sistema de riego. La secuencia del orden de aplicación de las medidas para la ganadería es el siguiente: M1. Reducción de la proteína en la dieta del porcino; M2. Plantas de tratamiento de estiércol; y M3. Cambio en la dieta por adición de lípidos. Las medidas planteadas tienen diferentes propósitos ambientales, no solo la reducción de emisiones sino también la preservación de la calidad del agua y del aire.

Los resultados muestran que la suma de la reducción de emisiones de las medidas tomadas de forma individual alcanza un potencial de reducción de 3,2 MtCO₂e, de los que 2,65 MtCO₂e son reducciones generadas por medidas que tienen un coste-eficiencia negativo. Si el coste-eficiencia es negativo, la medida supone beneficios en lugar de costes privados en la reducción de emisiones. Estas medidas se denominan medidas de mitigación Win-Win ya que mejoran tanto la renta de los agricultores como el bienestar de la sociedad.

Al aplicar las medidas, el beneficio ambiental alcanza los 128 M€. Las medidas que aumentan el secuestro de carbono (gestión forestal orientada en la captura de carbono, rotación de cultivos con leguminosas, cultivos cubierta, y laboreo reducido) mejoran la fertilidad del suelo y disminuyen la carga de nitratos, y consiguen reducir las emisiones en un 52%. Las medidas que disminuyen la fertilización mineral (ajuste de la fertilización nitrogenada, sustitución de fertilización mineral por orgánica, rotación de cultivos, modernización de regadíos, y cultivos cubierta) reducen las emisiones de óxido nitroso en un 38%.

El análisis de las medidas teniendo en cuenta la interacción entre ellas arroja un potencial de reducción de las emisiones de 2,9 MtCO₂e, de los que 2,5 MtCO₂e se reducen por medidas con coste-eficiencia negativo. Estas medidas con coste-eficiencia negativo reducen el 61% de las emisiones del sector agrario. En cuanto a las medidas con coste-eficiencia positivo (modernización del sistema de riego, inhibidores de nitrificación, y plantas de tratamientos de estiércol), reducen las emisiones en 0,4 MtCO₂e, pero suponen cubrir costes o inversiones significativas. El beneficio ambiental de las medidas con interacción alcanza los 115 M€, y este beneficio es un 10% menor que la suma de los beneficios de las medidas tomadas individualmente.

La interacción entre las medidas reduce la magnitud de la reducción que se obtiene con las medidas subsiguientes, por lo que aumenta el coste-eficiencia de las medidas adicionales que se toman. La reducción de emisiones de las medidas conjuntas cae en un 10% respecto a la suma de reducciones de las medidas tomadas de forma individual. Al tener en cuenta la interacción entre las medidas se modifica tanto el potencial de reducción como los costes que se obtienen con las medidas individuales por la interacción múltiple de cada medida adicional con las medidas anteriores.

Los resultados muestran que la gestión forestal orientada a la captura de carbono es la medida con el mayor potencial de reducción (0,66 MtCO₂e) y menor coste-eficiencia (-152 €/tCO₂e). La adición de lípidos en la dieta de ovino y bovino es la medida menos eficiente y con costes más elevados (536 €/tCO₂e para bovino y 2.768 €/tCO₂e para ovino).

El ajuste de la fertilización nitrogenada es una medida interesante en la mitigación de las emisiones GEI y tiene un grado de aplicación alto en la región porque genera beneficios económicos y ambientales, ya que mejora la renta de los agricultores y el beneficio social. Bajo esta medida, las emisiones directas e indirectas se reducen 0,3 MtCO₂e con un coste-eficiencia de -130 €/tCO₂e.

La sustitución de fertilización mineral por orgánica también es una medida de mitigación importante por las grandes cantidades de estiércol no utilizadas en la región. Esta medida reduce las emisiones en 0,3 MtCO₂e con un coste-eficiencia de -35 €/tCO₂e cuando las medidas se toman de forma individual, y una reducción de 0,2 MtCO₂e con un coste-eficiencia de -34 €/tCO₂e cuando se tiene en cuenta la medida previa “ajuste de la fertilización nitrogenada”.

La combinación más eficiente de medidas tanto si se consideran individualmente como de forma conjunta, se obtiene al seleccionar las mejores medidas. La combinación óptima de medidas consiste en reducir la fertilización nitrogenada, sustituir la fertilización mineral por orgánica, laboreo mínimo, rotación de cultivos con leguminosas, cultivos cubierta para herbáceos, cambiar en la dieta del porcino, y gestión forestal orientada a la captura de carbono. Estas medidas aumentan el beneficio social hasta los 299 M€ si las medidas se toman de forma individual, y hasta 259 M€ si se tiene en cuenta la interacción entre medidas.

El análisis de sensibilidad del beneficio social bajo distintos valores de coste social del carbono muestra que los resultados no cambian si el coste social del carbono se reduce a 20 €/tCO₂e. Si el coste social de carbono se incrementa hasta 80 €/tCO₂e, el potencial de reducción aumenta en 0,3 MtCO₂e cuando las medidas se analizan de forma individual porque entran medidas adicionales. Estas medidas adicionales que tienen un coste-eficiencia inferior a 80 €/tCO₂e son los cultivos cubierta para leñosos, y los inhibidores de nitrificación. Para las medidas con interacción el potencial de reducción solo aumenta un 0,2 MtCO₂e al entrar la medida adicional cultivos cubierta para leñosos.

Las proyecciones climáticas muestran un aumento muy significativo de las temperaturas a finales de este siglo. La FAO (2017) estima que la población mundial aumentará hasta 9.700 millones de habitantes en 2050, lo que provocará un aumento en la demanda de alimentos y de recursos hídricos. La CHE (2005) señala que el cambio climático tendrá impactos significativos sobre los recursos hídricos de la Cuenca del Ebro, y estima que la caída de la disponibilidad de agua puede llegar al 25% en el periodo 2040-2070.

Todos estos factores tienen implicaciones sobre el sector agrícola y las emisiones GEI en Aragón. Los resultados de los tres escenarios considerados de políticas de mitigación en el sector agrario muestran que las emisiones GEI alcanzarán 5,2 MtCO₂e en los próximos 30 años en un escenario continuista sin medidas, 4,2 MtCO₂e si se implementan las medidas más eficientes y viables en la

región, y 1,7 MtCO₂e si se implementan todas las medidas. El segundo escenario de implementación de las medidas más eficientes y viables consigue estabilizar las emisiones GEI entre 2014 y 2050, mientras que el tercer escenario de implementación de todas las medidas reduce las emisiones y contribuye a una gestión sostenible del sector agrario en 2050. Los resultados de estos escenarios pretenden facilitar una mejor toma de decisiones de los responsables de las políticas de mitigación del cambio climático.

Para superar las amenazas del cambio climático es necesario controlar la contaminación del sector agrario mediante la introducción de prácticas agrícolas más sostenibles, y combinar la utilización por los agentes de los sistemas de información con la organización institucional, para que pueda surgir la cooperación y la acción colectiva de reducir las emisiones. El diseño e implementación de las medidas adecuadas estará sometido a barreras y limitaciones financieras, agronómicas, organizativas, y de conflictos entre los grupos de interés. Algunas de estas barreras son la falta de conocimiento de los agricultores, la falta de confianza en las nuevas prácticas agrarias, la falta de incentivos para estimular la implementación de prácticas agrarias sostenibles, y la falta de cooperación entre los agentes.

La implementación eficiente de estas prácticas agrarias requerirá de políticas efectivas, que sean viables y se pueden hacer cumplir, de la colaboración estrecha entre científicos, agricultores, y el resto de los agentes, y también de una mayor conciencia pública que apoye a los responsables públicos y privados de la toma de decisiones. Esto significa que es necesario la cooperación entre todos los agentes y los distintos grupos de interés para alcanzar los objetivos de conservación de los recursos naturales y de protección del medio ambiente.

Este estudio puede ampliarse para mejorar los resultados y la contribución al proceso de toma de decisiones. En primer lugar, sería necesario examinar en detalle los costes de transacción de las medidas, y establecer los mecanismos que aseguren la adopción de las medidas de mitigación por los agricultores. La introducción de los costes de transacción en el análisis de los costes de las medidas puede dar valores de coste-eficiencia más realistas. Otro desafío es disponer de mayor conocimiento de los procesos biofísicos, para poder mejorar las estimaciones del potencial de reducción de las medidas de mitigación y los efectos de la interacción entre ellas. También habría que examinar si existe una interacción entre los costes de las distintas medidas. Por último, se podría introducir la teoría de juegos para analizar el comportamiento estratégico de los agentes. Esto permitiría evaluar los mecanismos que hacen surgir la cooperación de los agricultores y de los demás grupos de interés en la mitigación del cambio climático.



*REFERENCIAS
BIBLIOGRAFICAS*

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AEA, 2007. Adaptation to Climate Change in the Agriculture sector: Potential climate change impacts, risks and opportunities for EU agriculture. Report to European Commission Directorate General for Agriculture and Rural Development, Universidad politécnica de Madrid. Madrid.
- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), 2017. Temperatura media anual de España peninsular y Baleares (1965-2016). Madrid.
- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), 2018. Proyecciones de la temperatura máxima anual, Aragón. Madrid.
- Albiac, J., Soriano, J.S., Dinar, A., 2008. Game theory: A useful approach for policy evaluation in natural resources and the environment. En Albiac, J., Soriano, J.S y Dinar, A (Editores), *Game Theory and Policymaking in Natural Resources and the Environment*. Routledge. Londres.
- Albiac, J., Kahil, M.T., Calvo, E., Crespo, D., Esteban, E., 2016. Evaluación Socio Económica del Proyecto "LIFE-MANEV": Gestión y Tecnologías de Tratamiento de Estiércol para la Protección Medioambiental y la Sostenibilidad de la Ganadería en Europa. Documento de Trabajo 16/02. CITA. Zaragoza.
- Albiac, J., Kahil, M.T., Notivol, E., Calvo, E., 2017. Agriculture and Climate Change: Potential of mitigation in Spain. *Science of the Total Environment*, 592, 495-502.
- Álvaro-Fuentes, J., López, M.V., Cantero-Martínez, C., Arrúe, J.L., 2008. Tillage effects on soil organic carbon fractions in Mediterranean dryland agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 72, 541-547.
- Álvaro-Fuentes, J., Plaza-Bonilla, D., Arrúe, J.L., Lampurlanés, J., Cantero-Martínez, C., 2014. Soil organic carbon storage in a no-tillage chronosequence under Mediterranean conditions. *Plant and Soil*, 376, 31-41.
- Alexandratos, N., Bruinsma, J., 2012. World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision, ESA Working Paper No. 12-03, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- Ashes, J.R., Gulati, S.K., Scott, T.W., 1997. Potential to alter the content and composition of milk fat through nutrition. *Journal of Dairy Science*, 80, 2204-2212.
- Bajzelj, B., Richards, K.S., Allwood, J.M., Smith, P., Dennis, J.S., Curmi, E., Gilligan, C.A., 2014. The importance of food demand management for climate mitigation. *Nature Climate Change*, 4, 924-929.
- Balota, E.L., Calegari, A., Nakatani, A.S., Coyne, M.S., 2014. Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: a long-term study. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 197, 31-40.
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T.M., Lindquist, J.L., Shapiro, C.A., Elmore, R.W., Francis, C. A., Hergert, G.W., 2015. Cover crops and ecosystem services: insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 107, 2449-2474.
- Bangash, R.F., Passuello, A., Sanchez-Canales, M., Terrado, M., López, A., Elorza, F.J., Ziv, G., Acuña, V., Schuhmacher, M., 2013. Ecosystem services in Mediterranean river basin: climate change impact on water provisioning and erosion control. *Science of the Total Environment*, 458-460 : 246-255.
- Barnett, T.P., Adam, J.C., Lettenmaie, D.P., 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438, 303-309.

- Batchelor, J., Robert, J., 1983. Evaporation from their irrigation water, foliage and panicles of paddy rice in north-east Sri Lanka. *Agricultural Meteorology*, 29, 11-26.
- Bauwman, A.F., 1990. Land use related sources of greenhouse gases: present emissions and possible future trends. *Land Use Policy*, 7, 154–164.
- Beauchemin, K.A., Kreuzer, M., O'Mara, F., McAllister, T.A., 2008. Nutritional management for enteric methane abatement: A review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48, 21-27.
- Benavides, H., León, G., Aristizabal., 2007. Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología. Colombia.
- Benhabib, O., Yazar, A., Qadir, M., Lourenço, E., Jacobsen, S.E., 2014. How can we improve Mediterranean cropping systems? *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200, 325–332.
- Boadi, D., Benchaar, C., Chiquette, J., Massé, D., 2004. Mitigation strategies to reduce enteric methane emissions from dairy cows: Update review. *Canadian Journal of Animal Science*, 84, 319–335.
- Bravo, F., 2007. El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático. Fundación Gas Natural. Barcelona.
- Bravo, F., Bravo-Oveido, A., Diaz-Balteiro, L., 2008. Carbon sequestration in Spanish Mediterranean forests under two management alternatives: A modeling approach. *European Journal of Forest Research*, 127, 225-234.
- BRUMAS, Guía de buenas prácticas en la agricultura y ganadería que contribuyan a la lucha contra los efectos nocivos del cambio climático. La Oficina para la Sostenibilidad, el Cambio Climático y la Participación, Viceconsejería de Medio Ambiente, Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras del Gobierno del Principado de Asturias. Asturias.
- Bruemmer, C., Bruggemann, N., Butterbach-Bahl, K., Falk, U., Szarzynski, J., Vielhauer, K., Wassmann, R., Papen, H., 2008. Soil-atmosphere exchange of N₂O and NO in near-natural savanna and agricultural land in Burkina Faso (W. Africa). *Ecosystems*, 11, 582–600.
- Bruke, M., Emerick, k., 2016. Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture. *American Economic Journal: Economic Policy*, 8(1), 106-140.
- Burney, J.A., Davis, S.J., Lobel, D.B., 2010. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 107, 12052-12057.
- Capulin, G.J., Nuñez, E.R., Etchevers, B.J., Baca, C.G., 2001. Evaluation of liquid cattle manure extract as a plant nutrition input in hydroponics. *Agro-Science Journal*, 35, 287-299.
- Carvalho-Santos, C., Nunes, J.P., Monteiro, A.T., Hein, L., Honrado, J.P., 2016. Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal. *Hydrological Processes*, 30, 720-738.
- Chapuis-Lardy, L., Wrage, N., Metay, A., Chotte, J.L., Bernoux, M., 2007. Soils, a sink for N₂O? : A review. *Global Change Biology*, 13, 1–17.
- Chen, S., Chen, X., Xu, J., 2015. Impacts of climate change on agriculture: Evidence from China. *Journal of Environmental Economics and Management*, 76, 105-124.
- Confederación hidrográfica del Ebro (CHE), 2015. El plan hidrológico de la parte española de la demarcación del Ebro 2015-2021. Zaragoza.
- Confederación hidrográfica del Ebro (CHE), 2005. Evaluación preliminar de la incidencia del cambio

- climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ebro. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Zaragoza.
- Coase, R., 1960. The problem of social cost. *Journal of Law and Economics*. University of Chicago Press, 3, 1-44.
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J. L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J., Wehner, M., 2013. Chapter 12, Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) and Bureau of Meteorology, 2016. *State of the Climate 2016: Greenhouse gases*. Australia.
- Cuadrat, J.M., 2004. *El clima de Aragón*. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.
- Daudén, A., Teresa, M., Siegler, C., 2011. Proyecto demostrativo de gestión colectiva del purín en Aragón, Sociedad de Desarrollo Medioambiental de Aragón. Zaragoza.
- D'Amato, A.W., Bradford, J.B., Fraver, S., Palik, B.J., 2011. Forest management for mitigation and adaptation to climate change: Insights from long-term silviculture experiments. *Forest Ecology and Management*, 262, 803-816.
- Díaz-Ambrona, C.H., Mínguez, M.I., 2001. Cereal-legume rotations in a Mediterranean environment: biomass and yield production. *Field Crops Research*, 70,139-151.
- Diputación de Barcelona, 2008. *Modelos silvícolas privados en Mediterráneos*. Dirección de Comunicación de la Diputación de Barcelona. Barcelona.
- Dong, Y., Bae, H.D., McAllister, T.A., Mathison, G.W., Cheng, K.J., 1997. Lipid-induced depression of methane production and digestibility in the artificial rumen system (RUSITEC). *Canadian Journal of Animal Science*, 77, 269-278.
- Duin, E.C., Wagner, T., Shima, S., Prakash, D., Cronin, B., Yanez-Ruiz, D.R., Duval, S., Rumbeli, R., Stemmler, R.T., Thauer, R. K., kinderman, M., 2016. Mode of action uncovered for the specific reduction of methane emissions from ruminants by the small molecule 3-nitrooxypropanol. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 113, 6172–6177.
- European Environment Agency (EEA), 2005. *Vulnerability and adaptation to climate change in Europe*. Technical report No 7/2005. Dinamarca.
- European Environment Agency (EEA), 2012. *Water resources in Europe in the context of vulnerability*. State of Water Assessment. EEA Report No. 11/2012. Copenhagen.
- European Environment Agency (EEA), 2014a. *Factores de emisión del CH4 de la fermentación entérica*, base de datos.
- European Environment Agency (EEA), 2014b. *Factores de emisión del CH4 del manejo de estiércol*, base de datos.
- European Environment Agency (EEA), 2014c. *Factores de emisión del N2O del manejo de estiércol*, base de datos.
- Eory, V., Pellerin, S., Garcia, G.C., Lehtonen, H., Licite, I., Mattila, H., et al., 2018. Marginal abatement cost curves for agricultural climate policy: state-of-the art, lessons learnt and future potential.

- Journal of Cleaner Production, 182, 705–716.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2006. *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*. Roma.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2009. *The State of Food and Agriculture: Livestock in the Balance*. Roma.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2011. *Climate change, Water Food Security*. FAO Water Reports. No.36.Roma.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013. *Mitigation of Greenhouse Gas Emissions in Livestock Production. A Review of Technical Options for Non-CO2 Emissions*. Roma.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017. *El futuro de la alimentación y la agricultura: Tendencias y desafíos*. Version resumida. Roma.
- Fisher, A.C., Hanemann, W.M., Roberts, M.J., Schlenker, W., 2012. The economic impacts of climate change: evidence from agriculture output and random fluctuations in weather: comment. *American Economic Review*, 102, 3749-3760.
- Flotats, X., Foged, H., Blasi, A., Palatsi, J., Magri, A., Schelde, K., 2011. *Future trends on manure processing activities in Europe*. Technical Report No. II to the European Commission, Directorate-General Environment. Bruselas.
- Forte, A., Fiorentino, N., Fagnano, M., Fierro, A., 2017. Mitigation impact of minimum tillage on CO₂ and N₂O emissions from a Mediterranean maize cropped soil under low-water input management. *Soil and Tillage Research*, 166, 167-168.
- Gabriel, J.L., Quemada, M., 2011. Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: yield, N uptake and fertiliser fate. *European Journal of Agronomy*, 34,133-143.
- Gao, B., Ju, X., Su, F., Meng, Q., Oenema, O., Christie, P., Chen, X., Zhang, F., 2014. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: a two-year field study. *Science of the Total Environment*, 472, 112–124.
- García-Marco, S., Ravella, S.R., Chadwick, D., Vallejo, A., Gregory, A.S., Cárdenas, L.M., 2014. Ranking factors affecting emissions of GHG from incubated agricultural soils. *European Journal of Soil Science*, 65, 573–583.
- Garrote, L., Granados, A., Iglesias, A., 2016. Strategies to reduce water stress in Euro-Mediterranean river basins. *Science of the Total Environment*, 543, 997-1009.
- Gernaat, D.E., Calvin, K., Lucas, P.L., Luderer, G., Otto, S., Rao, S., Strefler, J., van, V.D.P., 2015. Understanding the contribution of non-carbon dioxide gases in deep mitigation scenarios. *Global Environmental Change*, 33, 142–153.
- Gobierno Aragón, 2008. *Estudio sobre la funcionalidad de la vegetación leñosa de Aragón como sumidero de CO₂: existencias y potencialidad (estimación cuantitativa y predicciones de fijación)*. Dirección General de Calidad Ambiental y Cambio Climático del Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- Gobierno de Aragón. 2009. *Plan de Acción del Gobierno de Aragón frente al Cambio Climático y de Energías Limpias 2008-2012*. Departamento de Medioambiente. Zaragoza.
- Gobierno de Aragón, 2014a. *Base de datos 1T de superficie de cultivos por termino municipal para Aragón 2014*. Departamento de Medioambiente. Zaragoza.

- Gobierno de Aragón, 2014b. Anuario estadístico agrario de Aragón 2013-2014. Servicio de Estudios, Análisis e Información del Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad del Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- Gobierno de Aragón, 2017. Documento de síntesis, la producción agraria en Aragón (2017). Sección de Estadística del Departamento de Agricultura y Alimentación. Zaragoza.
- González-Sánchez, E.J., Ordóñez-Fernández, R., Carbonell-Bojollo, R., Veroz- González, O., Gil-Ribes, J.A., 2012. Meta-analysis on atmospheric carbon capture in Spain through the use of conservation agriculture. *Soil and Tillage Research*, 122, 52–60.
- Guardia, S.T., 2010. Amortizar la modernización: un problema pendiente de resolución. *Boletín Inter Cuenas* nº23.
- Hardin, G., 1968. The tragedy of the commons. *Science*, 162, 1243-1248.
- Herrero, M., Henderson, B., Havlik, P., Thornton, P.K., Conant, R.T., Smith, P., Wiersenius, S., et al., 2016. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*, 6, 452-461.
- Hoffman, G.J, Jobes, J.A., 1978. Growth and water relation of cereal crops as influenced by salinity and relative humidity. *Agronomy Journal*, 70, 765-769.
- Holly, M., Larson, R, Powell, J., Ruark, M., Aguirre-Villegas, H., 2017. Greenhouse gas and ammonia emissions from digested and separated dairy manure during storage and after land application. *Agriculture Ecosystems and the Environment*, 239, 410–419.
- Holman, I.P., Brown, C., Janes, V., Sandars, D., 2017. Can we be certain about future land use change in Europe? A multi-scenario, integrated-assessment analysis. *Agricultural Systems*, 151, 126-135.
- Hristov, A.N., Oh, J., Giallongo, F., Frederick, T.W., Harper, M.T., Weeks, H.L., Branco, A.F., Moate, P.J., et al., 2015. An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 112, 10663-10668.
- Huérffano, X., Fuertes-Mendizábal, T., Duñabeitia, M.K., González-Murua, C., Estavillo, J.M., Menéndez, S., 2015. Splitting the application of 3,4- dimethylpyrazole phosphate (DMPP): Influence on greenhouse gases emissions and wheat yield and quality under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 64, 47–57.
- Instituto Aragonés de Estadística (IAEST), 2006. Superficie de los cultivos. Departamentos y Organismos Públicos. Aragón.
- Instituto Aragonés de Estadística (IAEST), 2017a. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), Datos estadísticos. Aragón y España.
- Instituto Aragonés de Estadística (IAEST), 2017b. Consumo de fertilizantes nitrogenados inorgánicos. Departamentos y Organismos Públicos. Aragón.
- Instituto Aragonés de Estadística (IAEST), 2017c. Población de Aragón, Departamentos y Organismos Públicos. Aragón.
- Instituto Aragonés de Estadística (IAEST), 2018a. superficie de Aragón. Departamentos y Organismos Públicos. Aragón.
- Instituto Aragonés de Estadística (IAEST), 2018b. Variables macroeconómicos de Aragón. Departamentos y Organismos Públicos. Aragón.
- Instituto Nacional de Estadística (INE), 2017. Superficie de España. España.

- Ingram, J., Mills, J., Freluh-Larsen, A., Davis, M., Merante, P., Ringrose, S., Molnar, A., Sanchez, B., Ghaley, B.B., Karaczun, Z., 2014. Managing soil organic carbon: a farm perspective. *EuroChoices* 13, 12-19.
- Iglesias, A., Quiroga, S., 2007. Measuring cereal production risk from climate variability across geographical areas in Spain. *Climate Research*, 34, 47-57.
- Iglesias, A., Garrote, L., Diz, A., Schlickerrieder, J., Martin-Carrasco, F., 2011. Re-thinking water policy priorities in the Mediterranean region in view of climate change. *Environmental Science Policy*, 14, 744-757.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1996. Libro de trabajo para el inventario de gases de efecto invernadero. Directrices del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2000. Agricultura, Capítulo 4: Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, Capítulo 1: Introducción. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007a. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the IPCC, IPCC, Ginebra.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007b. Climate Change 2007: The physical science. Contribution of Working Groups I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007c. Climate Change 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, Chapter 2. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007d. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014a. Summary for policymakers. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014b. Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014c. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2017. Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del-AR5.
- Junta de Andalucía., 2015. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura, Pesca y

- Desarrollo Rural, 111, 8-19. Andalucía.
- Kahil, M.T., 2011. Instrumentos de mitigación y adaptación al cambio climático en la agricultura de Aragón. Tesis de Máster. Instituto Agronómico Mediterránea de Zaragoza (IAMZ-CIHEAM). Zaragoza.
- Kahil, M.T., Albiac, J., 2012. Instrumentos de política de cambio climático en la agricultura de Aragón. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, 233, 15-44.
- Kahil, M.T., Albiac, J., 2013. Greenhouse gases mitigation policies in the agriculture of Aragon, Spain. *Bio-based and Applied Economics*, 2, 49-72.
- Kell, D., 2012. Large-scale sequestration of atmospheric carbon via plant roots in natural and agricultural ecosystems: why and how. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367, 1589-1597.
- Külling, D.R., Dohme, F., Menz, H., Sutter, F., Lischer, P., Kreuzer, M., 2002. Methane emissions of differently fed dairy cows and corresponding methane and nitrogen emissions from their manure during storage. *Environmental Monitoring and Assessment*, 79, 129-150.
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304, 1623-1627.
- Lal, R., Bruce, J.P., 1999. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environmental Science and Policy*, 2, 177-185.
- Lal, R., 2013. Soil carbon management and climate change. *Carbon Management*, 4, 439-462.
- Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Sitch, S., Korsbakken, J.I., Friedlingstein, P., Peters, G.P., Andres, R.J., Boden, T.A., et al., 2015. Global carbon budget 2015. *Earth System Science Data*, 7, 349-396.
- López-Moreno, J.I., Zabalza, J., Vicente-Serrano, S.M., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorin- Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J.M., Tague, C., 2014. Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science Total Environment*, 493, 1222-1231.
- MacCarl, B., Schneider, U., 2000. U.S. Agriculture's role in a greenhouse gas emission mitigation word: an economic perspective. *European Review of Agricultural Economics*, 22, 134-159.
- MacLeod, M., Moran, D., Eory, V., Rees, R.M., Barnes, A., Topp, C.F.E., Ball, B., Hoad, S., Wall, E., McVittie, A., Pajot, G., Matthews, R., Smith, P., Moxey, A., 2010. Developing greenhouse gas marginal abatement costs curves for agricultural emissions from crops and soils in the UK. *Agricultural Systems*, 103, 198-209.
- MacLeod, M., Eory, V., Gruère, G., Lankoski, J., 2015. Cost-Effectiveness of Greenhouse Gas Mitigation Measures for Agriculture: A Literature Review, *OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers*, No. 89. OCDE, París.
- Magnússon, R.I., Tietema, A., Cornelissen, J.H.C., Hefting, M.M., Kalbitz, K., 2016. Sequestration of carbon from coarse woody debris in forest soils. *Forest Ecology and Management*, 377, 1-15.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), 2008. Calculo de los costes de operación de cultivos en diferentes zonas agrícolas. Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), 2014. Balance del Nitrógeno en la Agricultura Española 2012. Madrid.

- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), 2016. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de España. Serie 1990–2014. Informe Resumen, Secretaría de Estado de Medio Ambiente. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014. Estudios de costes agrarias: resultados técnico-económicos, cultivos herbáceos (ECREA). Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014. Estudios de costes agrarias: resultados técnico-económicos, cultivos leñosos (ECREA). Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014. Estudios de costes agrarias: resultados técnico-económicos, hortícolas (ECREA). Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2012, 2013, 2014. Estudios de costes agrarias: resultados técnico-económicos, porcino (ECREA). Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2012, 2013, 2014. Estudios de costes agrarias: resultados técnico-económicos, ovino (ECREA). Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2012, 2013, 2014. Estudios de costes agrarias: resultados técnico-económicos, bovino (ECREA). Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2014a. Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad, Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC. Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2014b. Anuario de estadística 2014. Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2014c. Evaluación de técnicas de reducción de emisiones en ganadería: sectores de porcino y avicultura de carne y puesta. Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2017a. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de España, series 1990-2015. Informe resumen. Secretaria de estado de medio ambiente, Dirección general de calidad y evaluación ambiental y medio natural, Subdirección general de calidad del aire y medio ambiente industrial. Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2017b. Sumario de resultados. Proyecciones de emisiones de gases a la atmósfera, edición 2015-2050. Secretaria de estado de medio ambiente, Dirección general de calidad y evaluación ambiental y medio natural, Subdirección general de calidad del aire y medio ambiente industrial. Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2017c. Emisiones de GEI por comunidades autónomas a partir del inventario español, serie 1990-2015. Secretaria de estado de medio ambiente, Dirección general de calidad y evaluación ambiental y medio natural. Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), 2017d. Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos: Informe sobre regadíos en España (ESYRCE). Subdirección general de estadística, Secretaria general técnica. Madrid.
- Marquez-Garcia, F., Gonzalez-Sanchez, E.J., Castro-Garcia, S., Ordoñez-Fernandez, R., 2013. Improvement of soil carbon sink by cover crops in olive orchards under semiarid conditions.

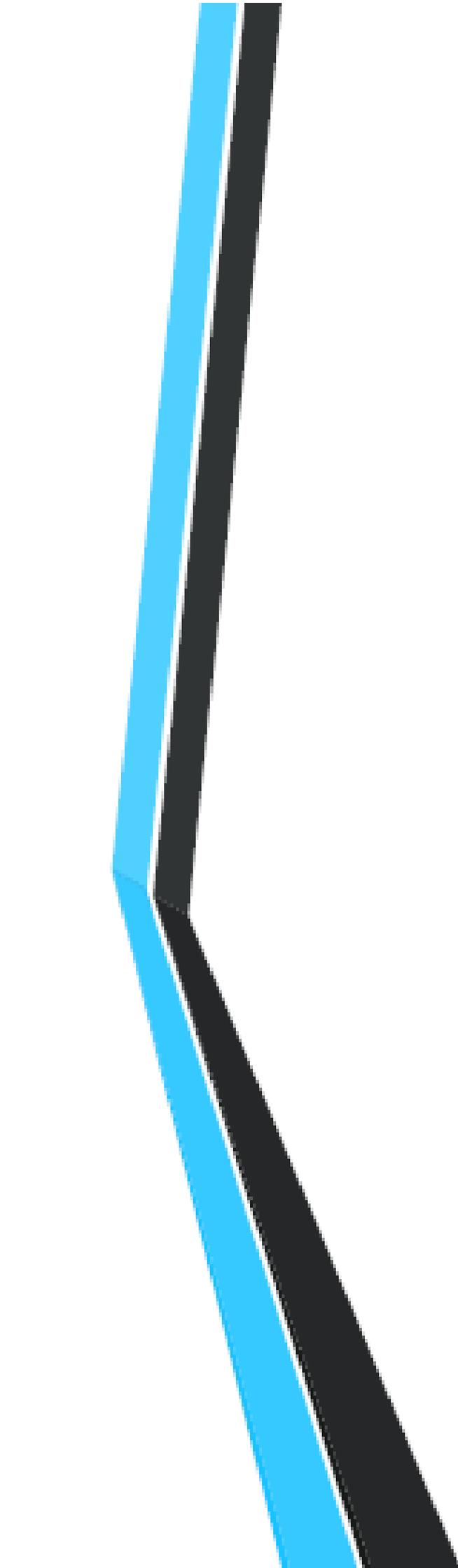
- Influence of the type of soil and weed. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11, 335-346.
- Martin, C., Morgavi, D.P., Doreau, M., 2010. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *Animal*, 4 (3), 351-365.
- Mathison, G.W., Okine, E.K., McAllister, T.A., Dong, Y., Galbraith, J., Dmytruk, O. I. N., 1998. Reducing methane emissions from ruminant animals. *Journal of Applied Animal Research*, 14, 1-28.
- Mema, M., 2006. Las políticas de control de la contaminación difusa en el valle medio del Ebro. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Zaragoza.
- Miner, J.R., Humenik, F.J., Overchash, M.R., 2000. *Managing Livestock Wastes to Preserve Environmental Quality*. Environmental Quality. Iowa State University Press, Ames, Estados Unidos.
- Monteny, G. J., Bannink, A., Chadwick, D., 2006. Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112, 163–170.
- Montes, F., Meinen, R., Dell, C., Rotz, A., Hristov, A. N., Oh, J., Waghorn, G., Gerber, P.J., Henderson, B., Makkar, H.P., Dijkstra, J., 2013. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: II. A review of manure management mitigation options. *Journal of Animal Science*, 91, 5070-5094.
- Moran, D., Macleod, M., Wall, E., Eory et al., 2011. Marginal Abatement Cost Curves for UK Agricultural Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Agricultural Economics*. 62, 93-118.
- Moran, D., Lucas, A., Barnes, A., 2013. Mitigation win-win. *Nature Climate Change*, 3, 611-613.
- Morell, F.J., Lampurlanés, J., Álvaro-Fuentes, J., Cantero-Martínez, C., 2011. Yield and water use efficiency of barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem: long-term effects of tillage and N fertilization. *Soil and Tillage Research*, 117, 76-84.
- Moss, A.R., Jouany, J.P., Newbold, J., 2000. Methane production by ruminants: Its contribution to global warming. *Annals of zootechnics, EDP Science*, 49, 231-253.
- Mourato, S., Moreira, M., Corte-Real, J., 2015. Water resources impact assessment under climate change scenarios in Mediterranean watersheds. *Water Resources Management*, 29, 2377-2391.
- National Aeronautics and Space Administration-Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS), 2018. Global Mean Estimates based on Land and Ocean Data. Estados Unidos.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2017. 2017 was 3rd warmest year on record for the globe. Estados Unidos.
- Napoleón., 2011. Economía del Control de la Contaminación Ambiental. *Revista Metalúrgica N 30*. Universidad Técnica de Oruro. Oruro.
- Oficina Española de Cambio Climático (OECC), 2007. Plan nacional de adaptación al cambio climático. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Madrid.
- Organización Cooperación Desarrollo Económico-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (OCDE-FAO), 2014. OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2014-2023. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo.
- Ogle, S.M., Breidt, F.J., Paustian, K., 2005. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*. 72, 87-121.
- Oficina Nacional de Bosques (ONF), 1993. Silvicultura de Pine blanco: Boletín Técnico de ONF n 25. Dirección general PACA. Francia.

- Orfila, D., 2007. Las externalidades. Contribuciones a la Economía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires.
- Orús, F., 2006. Fertilización nitrogenada: Guía de actualización. Informaciones Técnicas, Número extraordinario. Centro de Transferencia Agroalimentaria. Dirección General de Desarrollo Rural. Zaragoza.
- Ostrom, E., 1990. Governing the commons: The evolution of Institutions for Collective Action. *Natural Resources Journal*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Rautiainen, A., Sitch, S., Hayes, D., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333, 988-993.
- Pascual, A., Pukkala, T., De-Miguel, S., Pesonen, A., Packalen, P., 2018. Influence of timber harvesting costs on the layout of cuttings and economic return in forest planning based on dynamic treatment units. *Forest Systems*, 27, e001, eISSN: 2171-9845.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P., Smith, P., 2016. Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49–57.
- Pearce, D., Atkinson, G., Mourato, S., 2006. Cost-Benefit Analysis and the Environment: Recent Developments. OCDE, París.
- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., et al., 2017. Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture. *Environmental Science and Policy*, 77, 130-139.
- Pellerin, S., 2018. Socio-economic assessment of GHG mitigation?. Course of Greenhouse gas mitigation in Agriculture: concepts, methods and simulation tools (IAMZ_CIHEAM). Zaragoza.
- Perman, R., Ma, Y., Common, M., Madison, D., McGilvray, J., 2011. Natural resource and environmental economics, Fourth edition. Pearson Education Limited.
- Perni, A., Martínez-Paz, J.M., 2013. A participatory approach for selecting cost-effective measures in the WFD context: The Mar Menor (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 458–460, 303–311.
- Pigou, A., 1932. The economy of welfare. Cuarta edición. Macmillan. Londres.
- Plaza-Bonilla, D., Alvaro-Fuentes, J., Arrúe, J.L., Cantero-Martínez, C., 2014. Tillage and nitrogen fertilization effects on nitrous oxide yield-scaled emissions in a rainfed Mediterranean area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 189, 43–52.
- Pilegaard, K., 2013. Processes regulating nitric oxide emissions from soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 368.
- Poeplau, C., Don, A., 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops: a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200, 33-41.
- Pueyo, A.B., 2006. El plan Gira: El programa de residíos ganaderos. Aragón.
- Red Forestal para el Desarrollo Rural (RedFor), 2014. Observatorio de precios de productos forestales. España.
- Rauschkolb, R. S., Hornsby, A. C., 1994. Nitrogen Management in Irrigated Agriculture. Oxford University Press. Nueva York.
- Reisinger, A., Havlik, P., Riahi, K., van Vliet, O., Obersteiner, M., Herrero, M., 2013. Implications of alternative metrics for global mitigation costs and greenhouse gas emissions from agriculture. *Climate Change*, 117, 677–690.

- Rico, C., Rico, J.L., García, H., García, P.A., 2012. Solid-liquid separation of dairy manure: distribution of components and methane production. *Biomass and Bioenergy*, 39, 370-377.
- Rio, M., 1999. Regimines de claras y modelos de producción para *Pinus sylvestris* en los sistemas Central Iberico. Tesis doctoral, INIA. España.
- Roderick, M.L., Farquhar, G.D., 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 298, 1410-1411.
- Rodriguez-Lloveras, X., Buytaert, W., Benito, G., 2016. Land use can offset climate change induced increases in erosion in Mediterranean watersheds. *Catena*, 143, 244-255.
- Rotz, C.A., 2004. Management to reduce nitrogen losses in animal production. *Journal of Animal Science*, 82, 119-137.
- Ruiz-Benito, P., Lines, E.R., Gómez-Aparicio, L., Zavala, M.A., Coomes, D.A., 2013. Patterns and drivers of tree mortality in Iberian forests: Climatic effects are modified by competition. *Public Library of Science*, 8, e56843.
- Ruiz-Peinado, R., Río, M., Montero, G., 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, 20, 176-188.
- Ruiz-Peinado, R., Bravo-Oviedo, A., López-Senespleda, E., Bravo, F., Río, M., 2017. Forest management and carbon sequestration in the Mediterranean region: A review. *Forest Systems*, 26, eR04S.
- Sadras, V.O., Milroy, S.P., 1996. Soil-water thresholds for the response of leaf expansion and gas Exchange: a review. *Field Crops Research*, 47, 253-266.
- Salmeron, M., Cavero, J., Quilez, D., Isla, R., 2010. Winter cover crops affect monoculture maize yield and nitrogen leaching under irrigated Mediterranean conditions. *Agronomy journal*, 102, 1700-1709.
- Salmeron, M., Isla, R., Cavero, J., 2011. Effect of winter cover crop species and planting methods on maize yield and N availability under irrigated Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 123, 89-99.
- Sánchez, B., Álvaro-Fuentes, J., Cunningham, R., Iglesias, A., 2014. Towards mitigation of greenhouse gases by small changes in farming practices: understanding local barriers in Spain. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4, 1-34.
- Sánchez, B., Iglesias, A., McVittie, A., Alvaro-Fuentes, J., Ingram, J., Mills, J., Lesschen, J.P., Kuikman, P.J., 2016. Management of agricultural soils for greenhouse gas mitigation: learning from a case study in NE Spain. *Journal of Environmental Management*, 170, 37-49.
- Sánchez-Girón, V., Serrano, A., Hernanz, J.L., Navarrete, L., 2004. Economic assessment of three long-term tillage systems for rainfed cereal and legume production in semiarid central Spain. *Soil and Tillage Research*, 78, 35-44.
- Sánchez-Martín, L., Meijide, A., Garcia-Torres, L., Vallejo, A., 2010. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 137, 99-107.
- Sanz-Cobena, A., Lassaletta, L., Aguilera, E et al., 2017. Strategies for greenhouse gas emissions mitigation in Mediterranean agriculture: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 238, 5-24
- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N. W., Clarke, D. B., Dankersf, R., Eisneg, S., Fekete, B. M., Colón-González, F. J., Gosling, Kim, H., Liu, X., Masaki, Y., Portmann, F. T., Satoh, Y.,

- Stacke, T., Tang, Q., Wadar, Y., Wissers, D., Albrechta, T., Fielera, K., Pionteka, F., Warszawskia, L., Kaba, P., 2014. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*, 111, 3245-3250.
- Schlenker, W., Hanemann, W. M., Fisher, A.C., 2006. The impact of global warming on U.S. agriculture: An econometric analysis of optimal growing conditions. *Review of Economics and Statistics*, 88, 113-125.
- Schmitz, C., Meijl, H.V., Kyle, P et al., 2014. Land-use change trajectories up to 2050: insights from a global agro-economic model comparison. *Agricultural economics*, 45, 69-84.
- Shortle, J., Horan, R., 2017. Nutrient Pollution: A Wicked Challenge for Economic Instruments. *Water Economic and Policy*, 3, No2, 16500331-16500338.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 2099-2103.
- SmartSOIL, 2015. SmartSOIL: Fact sheets providing technical and economic information on five practices that promote good soil carbon management: crop rotation, residue management, adding manure or compost, cover and catch crops, and conservation agriculture. EU-FP7 SmartSOIL Project 289694.
- Smith, P., 2005. An overview of the permanence of soil organic carbon stocks: Influence of direct human-induced, indirect and natural effects. *European Journal of Soil Science*, 56, 673-680.
- Smith, P., 2012. Soils and climate change. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4, 539-544.
- Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., et al., 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Smith, S., Braathen, N., 2015. Monetary Carbon Values in Policy Appraisal: an Overview of Current Practices and Key Issues. OECD, Environment working Paper. París.
- Stern, N., 2007. *The Economics of Climate Change*. The Stern Review. Cambridge University Press. Cambridge.
- Teresa, M., Herrero, E., Bescós, B., 2016. Evaluación de sistemas de gestión de estiércol en Europa. Resultados del Proyecto LIFE-MANEV, Sociedad Aragonesa de Gestión Ambiental. Zaragoza.
- Tol, R.J.S., 2004. The Marginal damage costs of carbon dioxide emissions: An assessment of the uncertainties. *Energy Policy*, 33, 2064-2074.
- Tolosana, E., Torrijos, Y.A., Peña, S.V., 2002. Rendimientos, costes y efectos ambientales de las claras mecanizadas sobre repoblaciones de *Pinus sylvestris* L. en España. *Sistemas y Recursos Forestales*, 11, 39-65.
- Tolosana, E., Laina, R., Ambrosio, Y., Martin, M., 2011. Biomass Recovery from Spanish pine plantations mechanized thinnings residues. Effects of biomass piling methods and top diameters. *Forest Engineering, FORMEC*. Austria.
- Tolosana, E., Spinelli, R., Aminti, G., Laina, R., López-Vicens, I., 2018. Productivity, Efficiency and Environmental Effects of Whole-Tree Harvesting in Spanish Coppice Stands Using a Drive-to-Tree Disc Saw Feller-Buncher. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 39, 163-172.
- Thornton, P.K., 2010. Livestock production: recent trends, future prospects. *Philosophical Transactions*

- of the Royal Society, 365, 2853–2867.
- Thornton, P.K., Herrero, M., 2010. The potential for reduced methane and carbon dioxide emissions from livestock and pasture management in the tropics. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 107, 19667-19672.
- Tubiello, F. N., Salvatore, M., Ferrara, A. F., Rossi, S., Biancalani, R., Golec, R. D. C., Federici, S., Jacobs, H., Flammini, A., Prospero, P., Cardenas, P., Schmidhuber, J., Sanchez, M. J. S., Smith, P., House, J., Srivastava, N., 2015. The contribution of agriculture, forestry and other land use activities to global warming, 1990-2012. *Global Change Biology*, 21, 2655-2660.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2015. Adoption of the Paris Agreement. París.
- United Nations, 2017. World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). Estados Unidos.
- Ussiri, D., Lal, R., 2013. Soil emission of nitrous oxide and its mitigation.
- Wallace, J.S., 2000. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82, 105-119.
- Vayreda, J., Martínez-Vilalta, J., Gracia, M., Retana, J., 2012. Recent climate changes interact with stand structure and management to determine changes in tree carbon stocks in Spanish forests. *Global Change Biology*, 18, 1028-1041.
- Vermont, B., De Cara, S., 2010. How costly is mitigation of non-CO2 greenhouse gas emissions from agriculture?: A meta-analysis. *Ecological Economics*, 69, 1373-1386.
- Wang, W., Koslowski, F., Nayak, D.R., Smith, P., Saetnan, E., Ju, X., Guo, L., Han, G., de Perthuis, C., Lin, E., Moran, D., 2014. Greenhouse gas mitigation in Chinese agriculture: distinguishing technical and economic potentials. *Global Environmental Change*, 26, 53-62.
- Watkiss, P., Downing, T., Handley, C., Butterfield, R., 2005. The impacts and costs of climate change. Final report. European Commission.
- Welch, J.R., Vincent, J.R., Auffhammer, M., Moya, P.F., Dobermann, A., Dawe, D., 2010. Rice yields in tropical/subtropical asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*.
- Wilhelm, W.W., Johnson, J.M. F., Hatfield, J.L., Voorhees, W.B., Linden, D.R., 2004. Crop and soil productivity response to corn residue removal: a literature review. *Agronomy Journal*, 96, 1-17.
- Zhu, C., Kobayashi, K., Loladze, I., Zhu, J., Jian, Q., Xu, X., Liu, G., Seneweera, S., Ebi, L. K., Drewnowski, A., Fukagawa, N. K., Ziska, L.H., 2018. Carbon dioxide level this century will alter the protein, macronutrient and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice dependent countries. *Science Advances*, 4.



ANEXO

ANEXO

Índice de figuras

Figura 6. 1. Usos de suelos en Aragón.....	140
Figura 6. 2. Distribución de las cabezas ganaderas en Aragón.....	141
Figura 6. 3. Distribución de la superficie agrícola por tipo de cultivo en Aragón (ha).	142
Figura 6. 4. Fijación de carbono en las zonas forestales (tCO ₂ e).....	143

Índice de cuadros

Cuadro 6. 1. Superficie cultivada por grupo de cultivos (ha) ,2014.	144
Cuadro 6. 2. Distribución de la superficie de regadío por sistema de riego (ha), 2014.	145
Cuadro 6. 3. Número de cabezas por tipo de animal, 2014.	146
Cuadro 6. 4. Distribución de la superficie forestal por estrato.	147
Cuadro 6. 5. El nitrógeno excretado por tipo de animal y por comarca (kg/año).	148
Cuadro 6. 6. Las emisiones directas e indirectas de N ₂ O de la fertilización nitrogenada (tCO ₂ e).....	149
Cuadro 6. 7. Las emisiones del óxido nitroso de los cultivos secano y regadío (tCO ₂ e).	150
Cuadro 6. 8. Las emisiones de óxido nitroso del manejo de estiércol (tCO ₂ e).....	151
Cuadro 6. 9. Las emisiones del metano del manejo de estiércol (tCO ₂ e).	152
Cuadro 6. 10. Las emisiones de metano de la fermentación entérica (tCO ₂ e).	153
Cuadro 6. 11. Resultados de “El ajuste de la fertilización mineral por comarca”.....	154
Cuadro 6. 12. Resultados de “Sustitución de la fertilización mineral por orgánica por comarca”.	155
Cuadro 6. 13. Resultados de “La rotación de los cultivos con leguminosas por comarca”.....	156
Cuadro 6. 14. Resultados de “Plantas de tratamiento de estiércol por comarca”.	157
Cuadro 6. 15. Resultados de “Inhibidores de nitrificación por comarca”.....	158
Cuadro 6. 16. Resultados de “Modernización de los sistemas de regadío por comarca”.	159
Cuadro 6. 17. Resultados de “Reducción de laboreo por comarca”.....	160
Cuadro 6. 18. Resultados de “Reducción de proteína en la dieta de porcino por comarca”.....	161
Cuadro 6. 19. Resultados de “Cultivos cubierta para herbáceos por comarca”.	162
Cuadro 6. 20. Resultados de “Cultivos cubierta leñosos por comarca”.	163
Cuadro 6. 21. Resultados de “Adición de lípidos en la dieta de ovino y bovino por comarca”.	164
Cuadro 6. 22. Resultados de “El ajuste de la fertilización mineral por tipo de cultivo”.....	165
Cuadro 6. 23. Resultados de “Sustitución de la fertilización mineral por orgánica por tipo de cultivo”.	165
Cuadro 6. 24. Resultados de “La rotación de los cultivos con leguminosas por tipo de cultivo”.	165

Cuadro 6. 25. Resultados de “Modernización de los sistemas de regadío por tipo de cultivo”.....	166
Cuadro 6. 26. Resultados de “Reducción de laboreo por tipo de cultivo”.....	166
Cuadro 6. 27. Resultados del segundo escenario.....	166
Cuadro 6. 28. Resultados del tercer escenario.....	167

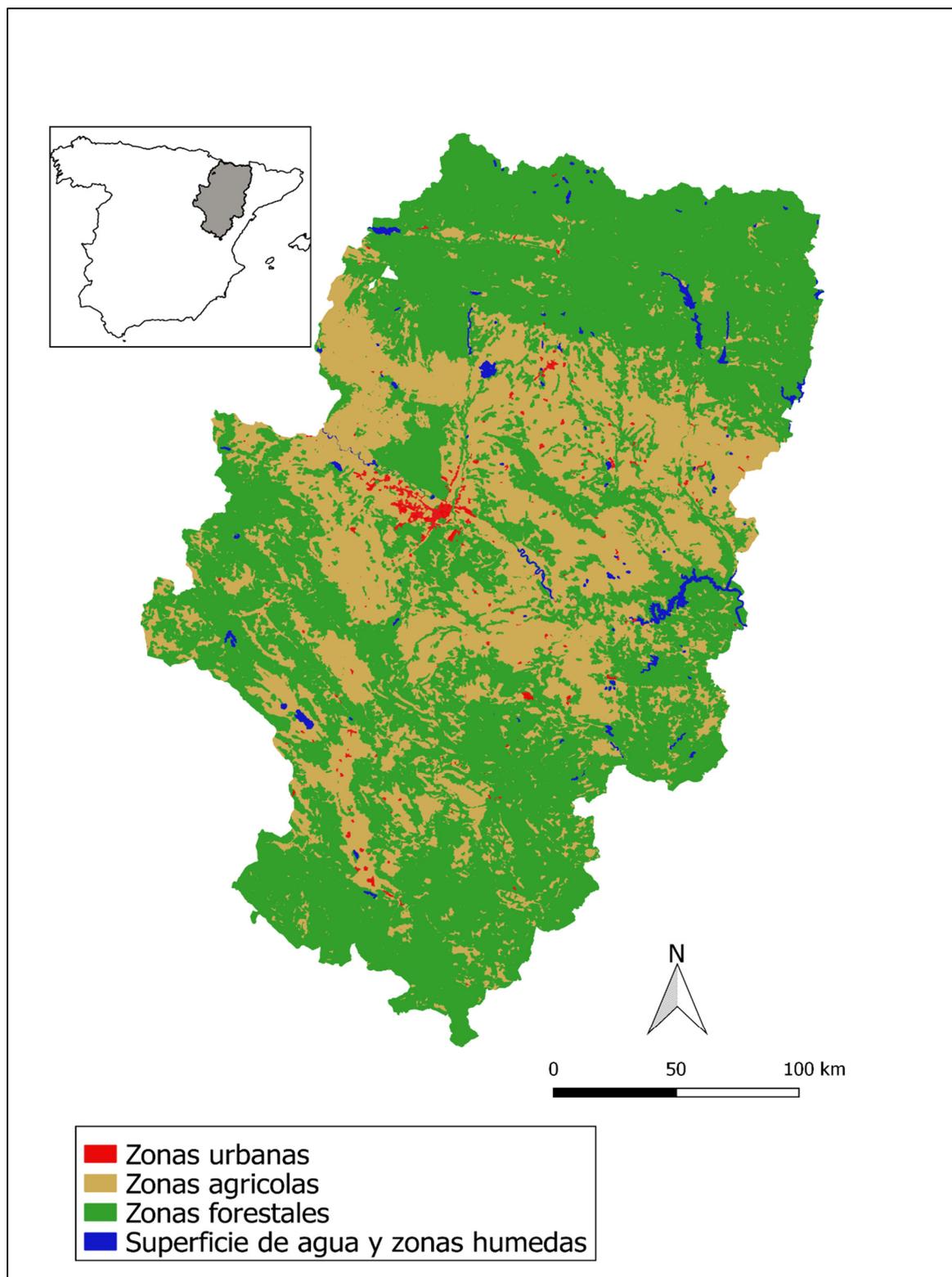


Figura 6. 1. Usos de suelos en Aragón¹⁴.

¹⁴ Datos del Corine land cover 2012.

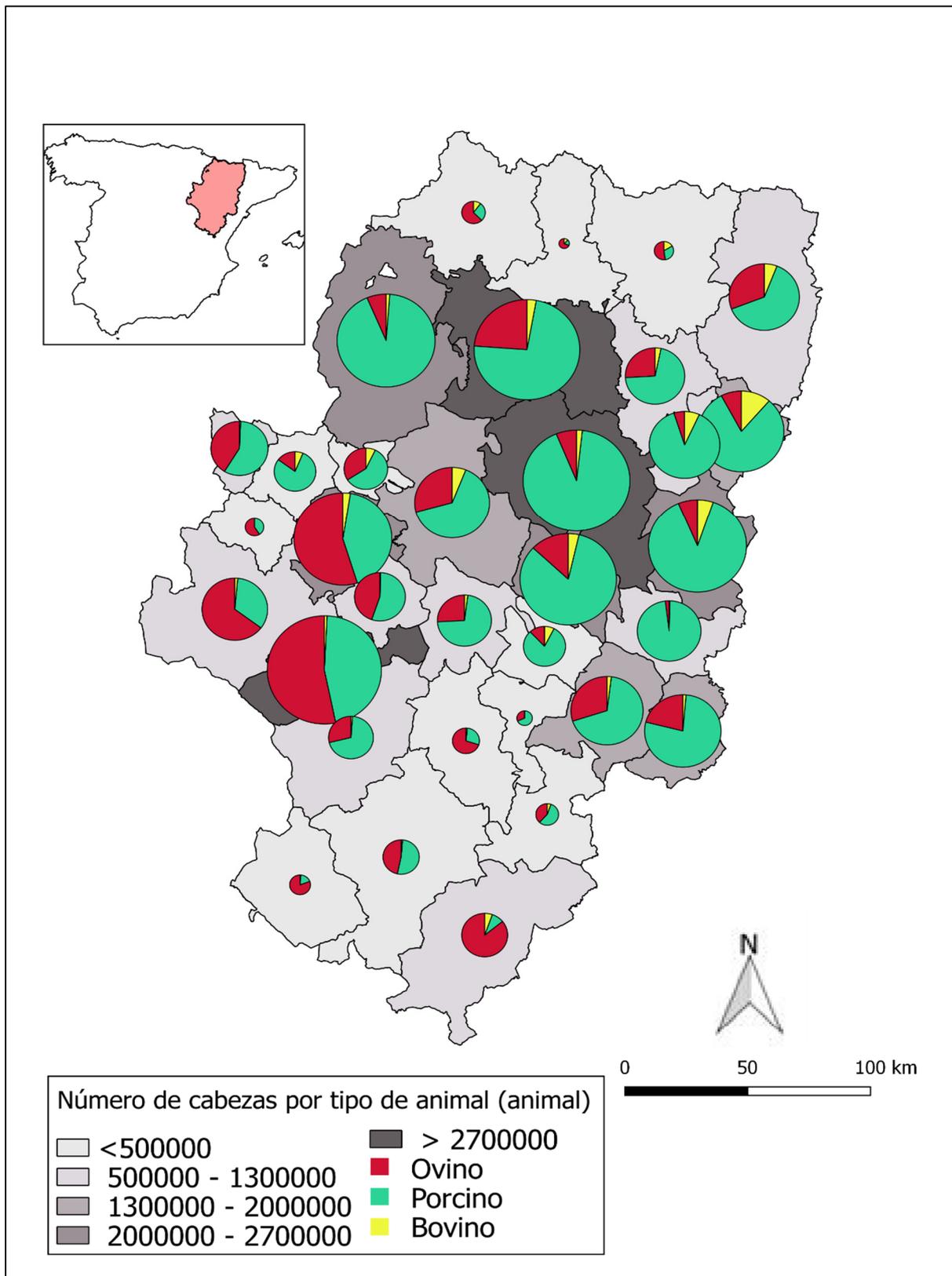


Figura 6. 2. Distribución de las cabezas ganaderas en Aragón.

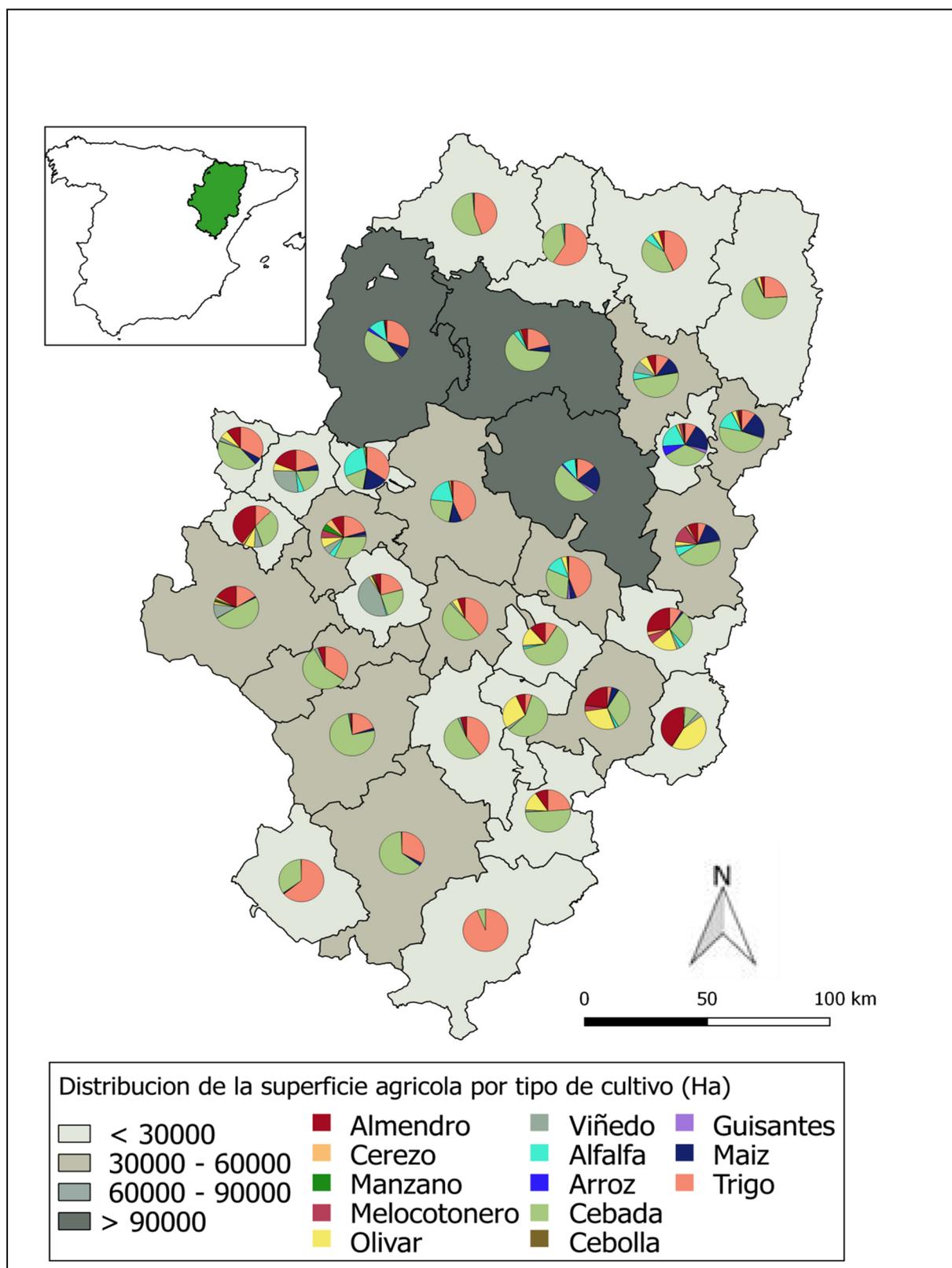


Figura 6. 3. Distribución de la superficie agrícola por tipo de cultivo en Aragón (ha).

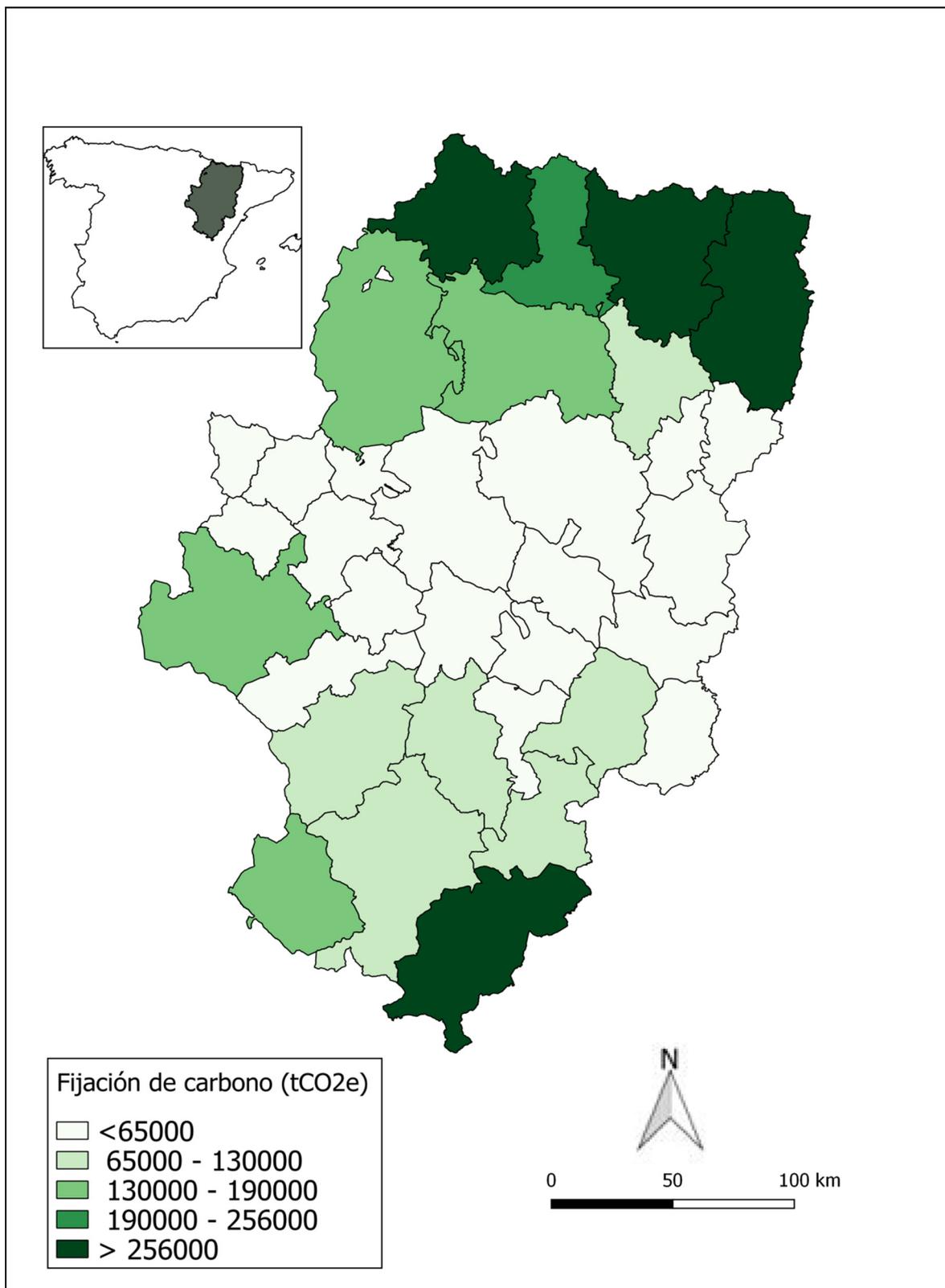


Figura 6. 4. Fijación de carbono en las zonas forestales (tCO₂e).

Cuadro 6. 1. Superficie cultivada por grupo de cultivos (ha) ,2014.

Comarca	Herbáceos (secano)	Leñosos (secano)	Herbáceos (regadío)	Leñosos (regadío)	Total superficie Cultivada
Alto Gállego	3.079	1	208	26	3.314
Andorra Sierra de Arcos	5.059	2.952	149	90	8.25
Aranda	2.022	2.387	67	180	4.656
Bajo Aragón	10.733	16.884	5.042	3.361	36.02
Bajo Aragón Caspe	6.079	8.859	4.156	5.125	24.219
Bajo Cinca	14.003	2.557	14.066	7.952	38.578
Bajo Martín	9.588	3.463	1.894	870	15.815
Campo de Belchite	2.5891	1.693	1.18	1.902	30.666
Campo de Borja	7.2	8.384	4.56	4.149	24.293
Campo de Cariñena	11.652	10.835	1.65	4.887	29.024
Campo de Daroca	31.206	2.762	1.254	52	35.274
Cinca Medio	2.935	355	24.821	1.691	29.802
Cinco Villas	53.309	1.396	5.7547	1.158	113.41
Comunidad de Calatayud	26.533	12.138	3.001	2.689	44.361
Comunidad de Teruel	29.825	74	4.659	0	34.558
Cuencas Mineras	12.041	842	419	7	13.309
Gúdar Javalambre	132	0	0	0	132
Hoya de Huesca	74.225	5.707	20.618	751	101.301
Jiloca	42.287	1.161	4.157	10	47.615
La Jacetania	12.119	81	782	0	12.982
La Litera	11.94	1.566	21.287	1.139	35.932
La Ribagorza	13.424	982	491	7	14.904
Los Monegros	54.166	1.328	67.756	734	123.984
Maestrazgo	2.64	830	212	145	3.827
Matarraña	2.398	18.859	78	477	21.812
Ribera Alta del Ebro	5.192	56	12.477	374	18.099
Ribera Baja del Ebro	17.623	120	11.038	1.545	30.326
Sierra de Albarracín	2.858	2	84	0	2.944
Sobrarbe	2.8	341	385	1	3.527
Somontano de Barbastro	1.9839	7.815	13.018	1.541	42.213
Tarazona y El Moncayo	3.646	767	2.808	778	7.999
Valdejalón	13.597	5.224	4.878	6.671	30.37
Zaragoza	27.77	524	22.616	1.227	52.137
Total	557.811	120.945	307.358	49.539	1.035.653

Fuente: Gobierno de Aragón (2014).

Cuadro 6. 2. Distribución de la superficie de regadío por sistema de riego (ha), 2014.

Comarcas	Aspersión	Goteo	Inundación	Total
Alto Gállego	0	0	234	234
Andorra Sierra de Arcos	0	0	239	239
Aranda	0	2	245	247
Bajo Aragón	0	0	8.403	8.403
Bajo Aragón Caspe	0	0	9.281	9.281
Bajo Cinca	8.942	5.480	7.596	22.018
Bajo Martín	0	0	2.764	2.764
Campo de Belchite	0	0	3.082	3.082
Campo de Borja	0	0	8.709	8.709
Campo de Cariñena	1.350	3.887	1.300	6.537
Campo de Daroca	0	0	1.306	1.306
Cinca Medio	15.284	1.396	9.832	26.512
Cinco Villas	11.833	2.038	44.835	58.705
Comunidad de Calatayud	0	297	5.393	5.690
Comunidad de Teruel	0	0	4659	4.659
Cuencas Mineras	0	0	426	426
Gúdar Javalambre	0	0	0	0
Hoya de Huesca	7.152	586	13.631	21.369
Jiloca	0	0	4.167	4.167
La Jacetania	0	0	782	782
La Litera	18.499	871	3.056	22.426
La Ribagorza	0	0	498	498
Los Monegros	39.583	1.329	27.578	68.490
Maestrazgo	0	0	357	357
Matarraña	0	0	555	555
Ribera Alta del Ebro	3.183	252	9.416	12.851
Ribera Baja del Ebro	3.301	376	8.905	12.583
Sierra de Albarracín	0	0	84	84
Sobrarbe	0	0	386	386
Somontano de Barbastro	8.810	1.228	4.521	14.559
Tarazona y El Moncayo	0	0	3.586	3.586
Valdejalón	1.150	5.983	4.416	11.549
Zaragoza	6.049	1.193	16.601	23.843
Total	125.136	24.917	206.844	356.897

Cuadro 6. 3. Número de cabezas por tipo de animal, 2014.

Comarcas	Ovino	Porcino	Gallinas	Vacuno de leche	Vacuno de carne	Total
Alto Gállego	20.049	5.382	0	0	3.556	28.987
Andorra Sierra de Arcos	18.773	40.661	0	0	91	59.526
Aranda	12.853	8.857	65.600	0	0	87.310
Bajo Aragón	90.631	205.702	1.002.936	129	5.668	1.305.066
Bajo Aragón Caspe	5.485	274.426	737.945	18	817	1.018.690
Bajo Cinca	32.512	449.459	1.889.903	1.187	25.029	2.398.089
Bajo Martín	12.323	82.517	340.488	0	7.686	443.014
Campo de Belchite	34.553	96.545	600.500	73	2.603	734.275
Campo de Borja	31.157	165.069	229.240	164	12.779	438.409
Campo de Cariñena	24.685	30.112	596.000	0	275	651.073
Campo de Daroca	66.295	57.344	3.143.313	0	944	3.267.896
Cinca Medio	20.402	365.666	842.571	986	27.323	1.256.948
Cinco Villas	60.909	882.220	1.447.000	1.997	9.278	2.401.404
Comunidad de Calatayud	106.226	55.465	918.990	208	2.092	1.082.981
Comunidad de Teruel	101.580	113.279	112.000	253	2.506	329.617
Cuencas Mineras	62.144	25.031	95.000	0	1.469	183.644
Gúdar Javalambre	119.172	12.139	388.800	0	7.468	527.579
Hoya de Huesca	127.648	392.736	2.261.769	509	14.610	2.797.272
Jiloca	87.586	212.699	20.5000	0	3.421	508.706
La Jacetania	36.553	15.916	80.528	0	5.941	138.939
La Litera	51.285	533.163	1.164.920	4.636	69.992	1.823.997
La Ribagorza	89.409	182.997	942.028	680	16.307	1.231.420
Los Monegros	73.573	1.091.533	1.686.801	1.493	18.885	2.872.284
Maestrazgo	43.332	63.961	18.000	0	6.040	131.333
Matarraña	52.457	193.011	1.208.740	0	3.323	1.457.532
Ribera Alta del Ebro	51.686	88.954	328.831	989	9.738	480.198
Ribera Baja del Ebro	24.044	154.177	2.144.148	94	6.542	2.329.004
Sierra de Albarracín	35.948	8.029	67.887	0	514	112.378
Sobrarbe	49.498	29.498	0	181	15.333	94.510
Somontano de Barbastro	89.560	244.825	539.990	200	10.860	885.435
Tarazona y El Moncayo	22.905	32.259	769.106	0	365	824.635
Valdejalón	86.956	67.862	2.239.636	0	3.874	2.398.328
Zaragoza	57.744	127.484	1.216.072	889	10.852	1.413.042
Total	1.799.934	6.308.979	27.283.742	14.686	306.182	35.713.523

Cuadro 6. 4. Distribución de la superficie forestal por estrato.

Comarcas	Arbolado claro	Coníferas de Alta montaña	Encinares Quejigares	Hayedos	Mixtos	Pinares	Pinares Calidad	Sabinares	Total
Alto Gállego	8.423	3.853	10.761	1.932	12.008	21646	24.193	65	82.881
Andorra Sierra de Arcos	2.830		411			6.627	5	1.752	11.625
Aranda	5.231		9.099			3.700			18.030
Bajo Aragón	27.406		6.773			28.529	1.572	3.135	67.416
Bajo Aragón Caspe	20.295		895			13.707			34.897
Bajo Cinca	8.711		914			18.440		188	28.252
Bajo Martín	2.654					5.040		1.225	8.918
Campo de Belchite	2.275		349			3.637			6.261
Campo de Borja	3.899		4.988			1.540			10.426
Campo de Cariñena	2.575		7.486			3.050			13.111
Campo de Daroca	10.945		9.239			6.247			26.431
Cinca Medio	806		434			406		633	2.278
Cinco Villas	24.391		21.634			38.981			85.005
Comunidad de Calatayud	18.273		19.315			23.521			61.110
Comunidad de Teruel	25.104		12.308			18.883	5.462	13.937	75.694
Cuencas Mineras	13.740		8.170			17.967	2.918	5.600	48.396
Gúdar Javalambre	23.968		23.207			46.881	28.469	25.557	148.082
Hoya de Huesca	4.388	43	27.611	29	5.704	15.609	5.046	6.080	64.511
Jiloca	17.093		13.481			6.454	3.484	2.526	43.037
La Jacetania	4.011	4.295	20.289	4.245	21.488	24.679	27.987	205	107.199
La Litera	1.590		7093			3.971		3.006	15.660
La Ribagorza	12.852	9.597	57.887	1.501	14.930	20.915	17.176	5.550	140.408
Los Monegros	2.853		2.044		7	9.926		1.180	16.010
Maestrazgo	8.284		6.193			12.403	12.152	2.195	41.228
Matarraña	6.022		5.072			30.370	1.166	516	43.145
Ribera Alta del Ebro	1.451					184			1.635
Ribera Baja del Ebro	4.826		1.583			4.672			11.082
Sierra de Albarracín	14.718		6.507			22.435	21.676	19.234	84.571
Sobrarbe	8.535	10.650	31.188	3.939	15.297	28.951	33.648	4.580	136.789
Somontano de Barbastro	6.444		18.666		653	5.992	459	8.086	40.300
Tarazona y El Moncayo	3.328		3.731			4.315			11.373
Valdejalón	2.569		1.420			3.244			7.232
Zaragoza	14.568		1.158			11.634			27.359
Total	315.055	28.439	339.906	11.646	70.087	464.558	185.413	105.249	1.520.354

Cuadro 6. 5. El nitrógeno excretado por tipo de animal y por comarca (kg/año).

Comarcas	Ovino	Porcino	Gallinas	Vacuno de leche	Vacuno de carne	Total
Alto Gállego	180.441	48.435	0	0	160.013	388.889
Andorra Sierra de Arcos	168.959	365.952	0	0	4.099	539.009
Aranda	115.681	79.712	26.240	0	0	221.633
Bajo Aragón	815.680	1.851.320	401.174	10.320	255.065	3.333.559
Bajo Aragón Caspe	49.364	2.469.833	295.178	1.440	36.753	2.852.568
Bajo Cinca	292.609	404.5128	755.961	94.927	1.126.292	6.314.917
Bajo Martín	110.909	742.657	136.195	0	345.856	1.335.617
Campo de Belchite	310.978	868.904	240.200	5.840	117.157	1.543.079
Campo de Borja	280.410	1.485.625	91.696	13.120	575.045	2.445.896
Campo de Cariñena	222.166	271.011	238.400	0	12.397	743.973
Campo de Daroca	596.656	516.096	1.257.325	0	42.471	2.412.549
Cinca Medio	183.615	3.290.998	337.028	78.854	1.229.533	5.120.028
Cinco Villas	548.184	7.939.978	578.800	159.760	417.512	9.644.234
Comunidad de Calatayud	956.032	499.185	367.596	16.640	94.153	1.933.07
Comunidad de Teruel	914.218	1.019.509	44.800	20.227	112.774	2.111.528
Cuencas Mineras	559.296	225.280	38.000	0	66.116	888.692
Gúdar Javalambre	1.072.546	109.254	155.520	0	336.044	1.673.364
Hoya de Huesca	1.148.831	3.534.622	904.708	40.759	657.454	6.286.374
Jiloca	788.274	1.914.287	82.000	0	153.967	2.938.528
La Jacetania	328.981	143.245	32.211	0	267.359	771.796
La Litera	461.568	4.798.463	465.968	370.918	3.149.649	9.246.566
La Ribagorza	804.679	1.646.969	376.811	54.434	733.804	3.616.697
Los Monegros	662.154	9.823.797	674.720	119.436	849.810	12.129.916
Maestrazgo	389.988	575.648	7.200	0	271.791	1.244.627
Matarraña	472.115	1.737.103	483.496	0	149.537	2.842.250
Ribera Alta del Ebro	465.175	800.585	131.532	79.120	438.202	1.914.615
Ribera Baja del Ebro	216.396	1.387.591	857.659	7.520	294.376	2.763.542
Sierra de Albarracín	323.532	72.260	27.155	0	23.143	446.090
Sobrarbe	445.486	265.482	0	14.474	689.985	1.415.428
Somontano de Barbastro	806.042	2.203.425	215.996	15.984	488.718	3.730.165
Tarazona y El Moncayo	206.143	290.333	307.642	0	16.412	820.531
Valdejalón	782.602	610.761	895.854	0	174.338	2.463.556
Zaragoza	519.699	1.147.359	486.429	71.120	488.356	2.712.963
Total	16.199.409	56.780.807	10.913.497	1.174.894	13.778.178	98.846.785

Cuadro 6. 6. Las emisiones directas e indirectas de N₂O de la fertilización nitrogenada (tCO₂e).

Comarcas	Emisiones directas (tCO ₂ e)	Emisiones indirectas (tCO ₂ e)	Total emisiones (tCO ₂ e)
Alto Gállego	1.267	333	1.599
Andorra Sierra de Arcos	3.409	761	4.169
Aranda	1.647	416	2.063
Bajo Aragón	20.965	9.514	30.479
Bajo Aragón Caspe	13.921	5.929	19.850
Bajo Cinca	32.754	17.315	50.069
Bajo Martín	7.914	2.296	10.210
Campo de Belchite	12.528	3.359	15.887
Campo de Borja	13.706	6.726	20.432
Campo de Cariñena	11.428	3.852	15.280
Campo de Daroca	14.158	3.384	17.542
Cinca Medio	31.335	16.671	48.006
Cinco Villas	85.784	38.585	124.369
Comunidad de Calatayud	19.959	6.287	26.245
Comunidad de Teruel	18.100	6.011	24.111
Cuencas Mineras	5.168	1.191	6.359
Gúdar Javalambre	36	8	44
Hoya de Huesca	56.803	20.278	77.080
Jiloca	23.588	6.934	30.521
La Jacetania	5.287	1.292	6.579
La Litera	3.1824	15.715	47.539
La Ribagorza	6.240	1.419	7.659
Los Monegros	112.498	60.083	172.581
Maestrazgo	1.623	416	2.039
Matarraña	7.252	1.700	8.953
Ribera Alta del Ebro	16.445	10.257	26.702
Ribera Baja del Ebro	17.645	7.548	25.193
Sierra de Albarracín	1.052	278	1.330
Sobrarbe	1.423	418	1.842
Somontano de Barbastro	28.813	12.956	41.769
Tarazona y El Moncayo	5.849	2.629	8.478
Valdejalón	16.459	7.031	23.490
Zaragoza	33.321	16.875	50.196
Total	660.198	288.466	948.664

Cuadro 6. 7. Las emisiones del óxido nitroso de los cultivos secano y regadío (tCO₂e).

Comarcas	Emisiones regadío (tCO ₂ e)	Emisiones secano (tCO ₂ e)	Total emisiones (tCO ₂ e)
Alto Gállego	342	1.257	1.599
Andorra Sierra de Arcos	353	3.816	4.169
Aranda	294	1.769	2.063
Bajo Aragón	18.571	11.909	30.479
Bajo Aragón Caspe	13.786	6.064	19.850
Bajo Cinca	41.840	8.229	50.069
Bajo Martín	3.979	6.231	10.210
Campo de Belchite	3.899	11.987	15.887
Campo de Borja	14.603	5.829	20.432
Campo de Cariñena	6.742	8.538	15.280
Campo de Daroca	2.401	15.141	17.542
Cinca Medio	46.320	1.686	48.006
Cinco Villas	99.728	24.641	124.369
Comunidad de Calatayud	9.443	16.802	26.245
Comunidad de Teruel	10.195	13.916	24.111
Cuencas Mineras	701	5.658	6.359
Gúdar Javalambre	0	44	44
Hoya de Huesca	39.171	37.910	77.080
Jiloca	9.330	21.191	30.521
La Jacetania	1.198	5.380	6.579
La Litera	40.602	6.937	47.539
La Ribagorza	819	6.840	7.659
Los Monegros	14.5937	26.644	172.581
Maestrazgo	493	1.546	2.039
Matarraña	743	8.210	8.953
Ribera Alta del Ebro	24.600	2.102	26.702
Ribera Baja del Ebro	18.110	7.083	25.193
Sierra de Albarracín	195	1.136	1.330
Sobrarbe	514	1.328	1.842
Somontano de Barbastro	29.010	12.758	41.769
Tarazona y El Moncayo	6658	1.820	8.478
Valdejalón	15.549	7.941	23.490
Zaragoza	38.930	11.267	50.196
Total	645.056	303.608	948.664

Cuadro 6. 8. Las emisiones de óxido nitroso del manejo de estiércol (tCO₂e).

Comarcas	Ovino	Bovino	Porcino	Gallinas	Total
Alto Gállego	1.679	1.489	451	0	3.618
Andorra Sierra de Arcos	1.572	38	3.404	0	5.014
Aranda	1.076	0	742	244	2.062
Bajo Aragón	7.588	2.469	17.223	3.732	31.012
Bajo Aragón Caspe	459	355	22.976	2.746	26.537
Bajo Cinca	2.722	11.361	37.631	7.033	58.747
Bajo Martín	1.032	3.217	6.909	1.267	12.425
Campo de Belchite	2.893	1.144	8.083	2.235	14.355
Campo de Borja	2.609	5.472	13.821	853	22.754
Campo de Cariñena	2.067	115	2.521	2.218	6.921
Campo de Daroca	5.551	395	4.801	11.697	22.444
Cinca Medio	1.708	12.172	30.616	3.135	47.631
Cinco Villas	5.100	5.370	73.864	5.384	89.719
Comunidad de Calatayud	8.894	1.031	4.644	3.420	17.988
Comunidad de Teruel	8.505	1.237	9.484	417	19.643
Cuencas Mineras	5.203	615	2.096	354	8.267
Gúdar Javalambre	9.978	3.126	1.016	1.447	15.567
Hoya de Huesca	10.687	6.495	32.882	8.416	58.481
Jiloca	7.333	1.432	17.808	763	27.337
La Jacetania	3.060	2.487	1.333	300	7.180
La Litera	4.294	32.751	44.639	4.335	86.019
La Ribagorza	7.486	7.333	15.322	3.505	33.646
Los Monegros	6.160	9.017	91.389	6.277	112.843
Maestrazgo	3.628	2.528	5.355	67	11.579
Matarraña	4.392	1.391	16.160	4.498	26.441
Ribera Alta del Ebro	4.327	4.813	7.448	1.224	17.811
Ribera Baja del Ebro	2.013	2.808	12.909	7.979	25.709
Sierra de Albarracín	3.010	215	672	253	4.150
Sobrarbe	4.144	6.553	2.470	0	13.168
Somontano de Barbastro	7.498	4.695	20.498	2.009	34.701
Tarazona y El Moncayo	1.918	153	2.701	2.862	7.633
Valdejalón	7.280	1.622	5.682	8.334	22.918
Zaragoza	4.835	5.205	10.674	4.525	25.238
Total	150.701	139.106	528.224	101.527	919.558

Cuadro 6. 9. Las emisiones del metano del manejo de estiércol (tCO₂e).

Comarcas	Ovino	Bovino	Porcino	Gallinas	Total
Alto Gállego	106	2.488	1.162	0	3.757
Andorra Sierra de Arcos	99	64	8.782	0	8.945
Aranda	68	0	1.913	15	1.996
Bajo Aragón	479	3.972	44.426	231	49.108
Bajo Aragón Caspe	29	572	59.268	170	60.039
Bajo Cinca	172	17.570	97.070	435	115.246
Bajo Martín	65	5.378	17.821	78	23.343
Campo de Belchite	183	1.825	20.851	138	22.997
Campo de Borja	165	8.950	35.650	53	44.818
Campo de Cariñena	131	193	6.503	137	6.964
Campo de Daroca	351	660	12.385	723	14.119
Cinca Medio	108	19.166	78.973	194	98.441
Cinco Villas	322	6.585	190.533	333	197.773
Comunidad de Calatayud	562	1.474	11.979	211	14.226
Comunidad de Teruel	537	1.765	24.465	26	26.793
Cuencas Mineras	329	1.028	5.406	22	6.785
Gúdar Javalambre	630	5.226	2.622	89	8.567
Hoya de Huesca	675	10.248	84.819	520	96.262
Jiloca	463	2.394	45.937	47	48.841
La Jacetania	193	4.158	3.437	19	7.807
La Litera	271	49.195	115.147	268	16.4881
La Ribagorza	473	11.443	39.522	217	51.654
Los Monegros	389	13.284	235.738	388	249.800
Maestrazgo	229	4.227	13.814	4	18.274
Matarraña	277	2.325	41.685	278	44.566
Ribera Alta del Ebro	273	6.860	19.211	76	26.421
Ribera Baja del Ebro	127	4.582	33.298	493	38.500
Sierra de Albarracín	190	360	1.734	16	2.300
Sobrarbe	262	10.738	6.371	0	17.371
Somontano de Barbastro	474	7.609	52.875	124	61.082
Tarazona y El Moncayo	121	255	6.967	177	7.520
Valdejalón	460	2.711	14.656	515	18.342
Zaragoza	305	7.636	27.533	280	35.753
Total	9.522	214.944	1.362.550	6.275	1.593.291

Cuadro 6. 10. Las emisiones de metano de la fermentación entérica (tCO₂e).

Comarcas	Ovino	Bovino	Total
Alto Gállego	3.984	3.418	7.402
Andorra Sierra de Arcos	3.731	88	3.818
Aranda	2.554	0	2.554
Bajo Aragón	18.010	5.754	23.764
Bajo Aragón Caspe	1.090	828	1.918
Bajo Cinca	6.461	26.871	33.332
Bajo Martín	2.449	7.387	9.836
Campo de Belchite	6.866	2.676	9.542
Campo de Borja	6.191	12.672	18.863
Campo de Cariñena	4.905	265	5.170
Campo de Daroca	13.174	907	14.081
Cinca Medio	4.054	28.600	32.654
Cinco Villas	12.104	13.654	25.758
Comunidad de Calatayud	21.109	2.504	23.614
Comunidad de Teruel	20.186	3.008	23.194
Cuencas Mineras	12.349	1.412	13.761
Gúdar Javalambre	23.682	7.178	30.859
Hoya de Huesca	25.366	15.251	40.617
Jiloca	17.405	3.289	20.694
La Jacetania	7.264	5.711	12.974
La Litera	10.191	78.270	88.461
La Ribagorza	17.767	17.287	35.055
Los Monegros	14.620	21.692	36.312
Maestrazgo	8.611	5.805	14.416
Matarraña	10.424	3.194	13.618
Ribera Alta del Ebro	10.271	11.705	21.976
Ribera Baja del Ebro	4.778	6.511	11.289
Sierra de Albarracín	7.144	494	7.638
Sobrarbe	9.836	15.167	25.003
Somontano de Barbastro	17.797	10.913	28.710
Tarazona y El Moncayo	4.552	351	4.902
Valdejalón	17.280	3.724	21.004
Zaragoza	11.475	12.539	24.014
Total	357.683	329.121	686.804

Cuadro 6. 11. Resultados de “El ajuste de la fertilización mineral por comarca”¹⁵.

Comarcas	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Alto Gállego	550	-0,08	0,02	0,10	-141
Andorra Sierra de Arcos	2.058	-0,30	0,08	0,38	-145
Aranda	1.202	-0,17	0,05	0,22	-142
Bajo Aragón	12.830	-1,69	0,51	2,20	-132
Bajo Aragón Caspe	10.100	-1,29	0,40	1,69	-127
Bajo Cinca	15.776	-1,91	0,63	2,54	-121
Bajo Martín	4.724	-0,65	0,19	0,84	-138
Campo de Belchite	6.800	-0,94	0,27	1,21	-138
Campo de Borja	7.282	-0,94	0,29	1,23	-129
Campo de Cariñena	6.238	-0,84	0,25	1,09	-135
Campo de Daroca	6.914	-0,99	0,28	1,27	-143
Cinca Medio	12.169	-1,47	0,49	1,96	-121
Cinco Villas	34.309	-4,39	1,37	5,76	-128
Comunidad de Calatayud	11.506	-1,58	0,46	2,04	-138
Comunidad de Teruel	8.182	-1,12	0,33	1,45	-137
Cuencas Mineras	2.481	-0,36	0,10	0,46	-144
Gúdar Javalambre	13	0,00	0,00	0,00	-144
Hoya de Huesca	25.449	-3,47	1,02	4,49	-136
Jiloca	11.176	-1,57	0,45	2,01	-140
La Jacetania	2.418	-0,34	0,10	0,44	-143
La Litera	11.688	-1,47	0,47	1,94	-126
La Ribagorza	3.096	-0,45	0,12	0,57	-144
Los Monegros	40.642	-5,04	1,63	6,66	-124
Maestrazgo	948	-0,13	0,04	0,17	-140
Matarraña	6.264	-0,91	0,25	1,16	-145
Ribera Alta del Ebro	4.788	-0,56	0,19	0,75	-117
Ribera Baja del Ebro	7.471	-0,96	0,30	1,26	-128
Sierra de Albarracín	436	-0,06	0,02	0,08	-142
Sobrarbe	635	-0,09	0,03	0,12	-142
Somontano de Barbastro	12.123	-1,59	0,48	2,08	-131
Tarazona y El Moncayo	3.029	-0,38	0,12	0,50	-127
Valdejalón	9.810	-1,24	0,39	1,63	-126
Zaragoza	11.066	-1,40	0,44	1,84	-127
Total	294.176	-38,39	11,77	50,16	-130

¹⁵ **RP:** Reducción potencial (tCO₂e).
CE: Coste-eficiencia (€/tCO₂e).
CP: Coste privado.

BS: Beneficio social (M€).
BA: Beneficio ambiental (M€).

Cuadro 6. 12. Resultados de “Sustitución de la fertilización mineral por orgánica por comarca”.

Comarcas	Sin interacción					Con interacción				
	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Alto Gállego	529	-0,02	0,02	0,04	-40	348	-0,01	0,01	0,03	-40
Andorra Sierra de Arcos	1.378	-0,06	0,06	0,11	-42	699	-0,03	0,03	0,06	-41
Aranda	681	-0,03	0,03	0,06	-41	285	-0,01	0,01	0,02	-41
Bajo Aragón	10.100	-0,35	0,40	0,76	-35	5.866	-0,19	0,23	0,43	-33
Bajo Aragón Caspe	6.611	-0,23	0,26	0,50	-36	3.278	-0,11	0,13	0,24	-35
Bajo Cinca	16.571	-0,55	0,66	1,21	-33	11.364	-0,37	0,45	0,83	-33
Bajo Martín	3.401	-0,13	0,14	0,27	-39	1.842	-0,07	0,07	0,15	-39
Campo de Belchite	5.263	-0,21	0,21	0,42	-40	3.019	-0,12	0,12	0,24	-41
Campo de Borja	6.766	-0,23	0,27	0,50	-34	4.363	-0,14	0,17	0,32	-33
Campo de Cariñena	5.046	-0,19	0,20	0,39	-38	2.987	-0,11	0,12	0,23	-38
Campo de Daroca	5.811	-0,24	0,23	0,47	-41	3.530	-0,14	0,14	0,29	-41
Cinca Medio	15.958	-0,53	0,64	1,17	-33	11.942	-0,39	0,48	0,87	-33
Cinco Villas	41.454	-1,45	1,66	3,10	-35	30.132	-1,03	1,21	2,24	-34
Comunidad de Calatayud	8.709	-0,34	0,35	0,68	-39	4.912	-0,19	0,20	0,38	-38
Comunidad de Teruel	8.019	-0,30	0,32	0,63	-38	5.319	-0,20	0,21	0,41	-37
Cuencas Mineras	2.105	-0,09	0,08	0,17	-41	1.286	-0,05	0,05	0,10	-41
Gúdar Javalambre	15	0,00	0,00	0,00	-42	10	0,00	0,00	0,00	-42
Hoya de Huesca	25.607	-0,96	1,02	1,98	-37	17.209	-0,63	0,69	1,32	-36
Jiloca	10.146	-0,40	0,41	0,80	-39	6.458	-0,25	0,26	0,51	-38
La Jacetania	2.180	-0,09	0,09	0,18	-41	1.382	-0,06	0,06	0,11	-41
La Litera	15.714	-0,54	0,63	1,16	-34	11.857	-0,40	0,47	0,87	-33
La Ribagorza	2.537	-0,10	0,10	0,21	-41	1.515	-0,06	0,06	0,12	-41
Los Monegros	57.192	-1,89	2,29	4,18	-33	43.780	-1,42	1,75	3,17	-32
Maestrazgo	677	-0,03	0,03	0,05	-40	364	-0,01	0,01	0,03	-41
Matarraña	2.951	-0,12	0,12	0,24	-41	884	-0,04	0,04	0,07	-41
Ribera Alta del Ebro	8.833	-0,28	0,35	0,63	-31	7.253	-0,22	0,29	0,51	-31
Ribera Baja del Ebro	8.385	-0,30	0,34	0,63	-35	5.919	-0,21	0,24	0,44	-35
Sierra de Albarracín	440	-0,02	0,02	0,04	-40	296	-0,01	0,01	0,02	-40
Sobrarbe	610	-0,02	0,02	0,05	-39	400	-0,02	0,02	0,03	-39
Somontano de Barbastro	13.835	-0,48	0,55	1,04	-35	9.835	-0,33	0,39	0,73	-34
Tarazona y El Moncayo	2.835	-0,10	0,11	0,21	-35	1.835	-0,06	0,07	0,14	-34
Valdejalón	7.788	-0,28	0,31	0,59	-36	45.51	-0,16	0,18	0,34	-35
Zaragoza	16.626	-0,56	0,67	1,23	-34	12.975	-0,43	0,52	0,95	-33
Total	314.775	-11,12	12,59	23,71	-35	217.697	-7,49	8,71	16,20	-34

Cuadro 6. 13. Resultados de “La rotación de los cultivos con leguminosas por comarca”.

Comarcas	Sin interacción					Con interacción				
	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Alto Gállego	2.076	-0,10	0,08	0,18	-49	1.719	-0,05	0,07	0,12	-29
Andorra Sierra de Arcos	3.704	-0,21	0,15	0,35	-56	2.899	-0,09	0,12	0,20	-30
Aranda	1.439	-0,08	0,06	0,13	-53	1.148	-0,03	0,05	0,08	-30
Bajo Aragón	7.854	-0,44	0,31	0,75	-56	6.150	-0,19	0,25	0,43	-30
Bajo Aragón Caspe	4.308	-0,23	0,17	0,40	-53	3.447	-0,10	0,14	0,24	-30
Bajo Cinca	10.263	-0,57	0,41	0,98	-56	8.028	-0,25	0,32	0,57	-31
Bajo Martín	6.986	-0,39	0,28	0,67	-55	5.486	-0,17	0,22	0,39	-30
Campo de Belchite	17.892	-0,91	0,72	1,63	-51	14.565	-0,43	0,58	1,01	-29
Campo de Borja	4.940	-0,25	0,20	0,45	-50	4.042	-0,12	0,16	0,28	-29
Campo de Cariñena	7.997	-0,40	0,32	0,72	-50	6.541	-0,19	0,26	0,45	-29
Campo de Daroca	21.801	-1,13	0,87	2,00	-52	17.616	-0,52	0,70	1,22	-29
Cinca Medio	2.156	-0,12	0,09	0,21	-56	1.684	-0,05	0,07	0,12	-31
Cinco Villas	37.152	-1,92	1,49	3,41	-52	30.070	-0,88	1,20	2,09	-29
Comunidad de Calatayud	18.909	-1,01	0,76	1,77	-54	15.073	-0,45	0,60	1,05	-30
Comunidad de Teruel	20.970	-1,10	0,84	1,94	-52	16.871	-0,50	0,67	1,17	-30
Cuencas Mineras	8.352	-0,43	0,33	0,76	-51	6.782	-0,20	0,27	0,47	-29
Gúdar Javalambre	84	0,00	0,00	0,01	-44	72	-0,002	0,003	0,005	-27
Hoya de Huesca	52.907	-2,83	2,12	4,95	-54	42.170	-1,26	1,69	2,95	-30
Jiloca	30.296	-1,64	1,21	2,85	-54	24.064	-0,72	0,96	1,68	-30
La Jacetania	8.375	-0,43	0,33	0,76	-51	6.818	-0,20	0,27	0,47	-29
La Litera	8.785	-0,49	0,35	0,84	-56	6.854	-0,21	0,27	0,48	-31
La Ribagorza	9.556	-0,51	0,38	0,89	-53	7.623	-0,23	0,30	0,53	-30
Los Monegros	38.557	-2,06	1,54	3,60	-53	30.760	-0,92	1,23	2,15	-30
Maestrazgo	1.860	-0,10	0,07	0,17	-53	1.494	-0,04	0,06	0,10	-30
Matarraña	1.753	-0,10	0,07	0,17	-56	1.374	-0,04	0,05	0,10	-30
Ribera Alta del Ebro	3.481	-0,17	0,14	0,31	-48	2.893	-0,08	0,12	0,20	-29
Ribera Baja del Ebro	11.802	-0,57	0,47	1,04	-48	9.818	-0,28	0,39	0,67	-28
Sierra de Albarracín	1.911	-0,09	0,08	0,17	-48	1.591	-0,05	0,06	0,11	-28
Sobrarbe	1.917	-0,10	0,08	0,17	-50	1.571	-0,05	0,06	0,11	-29
Somontano de Barbastro	14.335	-0,78	0,57	1,36	-55	11.321	-0,34	0,45	0,79	-30
Tarazona y El Moncayo	2.496	-0,13	0,10	0,22	-50	2.045	-0,06	0,08	0,14	-29
Valdejalón	9.448	-0,49	0,38	0,86	-51	7.663	-0,22	0,31	0,53	-29
Zaragoza	18.596	-0,90	0,74	1,64	-48	15.471	-0,44	0,62	1,06	-28
Total	392.960	-20,66	15,72	36,38	-53	315.723	-9,35	12,63	21,98	-30

Cuadro 6. 14. Resultados de “Plantas de tratamiento de estiércol por comarca”.

Comarcas	Sin interacción					Con interacción				
	RP (tCO _{2e})	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO _{2e})	RP (tCO _{2e})	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO _{2e})
Alto Gállego	2616	0,35	0,105	-0,25	134	0	0	0,00	0,00	
Andorra Sierra de Arcos	2616	0,35	0,105	-0,25	134	0	0	0,00	0,00	
Aranda	0	0,35	0,000	-0,35	0	0	0	0,00	0,00	
Bajo Aragón	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Bajo Aragón Caspe	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Bajo Cinca	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Bajo Martín	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Campo de Belchite	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Campo de Borja	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Campo de Cariñena	2616	0,35	0,105	-0,25	134	0	0	0,00	0,00	
Campo de Daroca	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Cinca Medio	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Cinco Villas	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Comunidad de Calatayud	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Comunidad de Teruel	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Cuencas Mineras	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Gúdar Javalambre	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Hoya de Huesca	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Jiloca	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
La Jacetania	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
La Litera	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
La Ribagorza	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Los Monegros	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Maestrazgo	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Matarraña	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Ribera Alta del Ebro	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Ribera Baja del Ebro	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Sierra de Albarracín	2616	0,35	0,105	-0,25	134	0	0	0,00	0,00	
Sobrarbe	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2.616	0,35	0,10	-0,25	134
Somontano de Barbastro	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2616	0,35	0,10	-0,25	134
Tarazona y El Moncayo	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2616	0,35	0,10	-0,25	134
Valdejalón	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2616	0,35	0,10	-0,25	134
Zaragoza	2616	0,35	0,105	-0,25	134	2616	0,35	0,10	-0,25	134
Total	83726	11,55	3,349	-8,20	138	73260	9,8	2,93	-6,87	134

Cuadro 6. 15. Resultados de “Inhibidores de nitrificación por comarca”.

Comarcas	Sin interacción					Con interacción				
	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Alto Gállego	177	0,058	0,007	-0,050	325	0	0,06	0,00	-0,06	0
Andorra Sierra de Arcos	54	0,012	0,002	-0,010	224	9	0,01	0,00	-0,01	1272
Aranda	52	0,016	0,002	-0,014	316	1	0,02	0,00	-0,02	20636
Bajo Aragón	2.903	0,085	0,116	0,031	29	1.500	0,09	0,06	-0,03	57
Bajo Aragón Caspe	782	0,067	0,031	-0,036	86	327	0,07	0,01	-0,05	206
Bajo Cinca	6.801	0,215	0,272	0,057	32	3.237	0,22	0,13	-0,09	67
Bajo Martín	157	0,033	0,006	-0,027	210	32	0,03	0,00	-0,03	1043
Campo de Belchite	1.116	0,361	0,045	-0,316	323	3	0,36	0,00	-0,36	114301
Campo de Borja	1.891	0,143	0,076	-0,067	76	825	0,14	0,03	-0,11	173
Campo de Cariñena	547	0,178	0,022	-0,156	325	0	0,18	0,00	-0,18	0
Campo de Daroca	1.296	0,371	0,052	-0,320	287	87	0,37	0,00	-0,37	4278
Cinca Medio	6.824	0,199	0,273	0,074	29	3.243	0,20	0,13	-0,07	61
Cinco Villas	11.946	0,943	0,478	-0,465	79	4.689	0,94	0,19	-0,76	201
Comunidad de Calatayud	1.374	0,223	0,055	-0,168	162	391	0,22	0,02	-0,21	571
Comunidad de Teruel	2.222	0,340	0,089	-0,251	153	668	0,34	0,03	-0,31	510
Cuencas Mineras	502	0,159	0,020	-0,139	317	7	0,16	0,00	-0,16	22415
Gúdar Javalambre	12	0,004	0,000	-0,003	325	0	0,00	0,00	0,00	0
Hoya de Huesca	7.264	0,728	0,291	-0,438	100	2.656	0,73	0,11	-0,62	274
Jiloca	2.194	0,313	0,088	-0,226	143	698	0,31	0,03	-0,29	449
La Jacetania	519	0,169	0,021	-0,148	325	0	0,17	0,00	-0,17	0
La Litera	7.401	0,236	0,296	0,060	32	3.424	0,24	0,14	-0,10	69
La Ribagorza	368	0,109	0,015	-0,094	296	19	0,11	0,00	-0,11	5747
Los Monegros	30.297	1,206	1,212	0,006	40	14.204	1,21	0,57	-0,64	85
Maestrazgo	82	0,027	0,003	-0,024	325	0	0,03	0,00	-0,03	0
Matarraña	21	0,006	0,001	-0,005	303	1	0,01	0,00	-0,01	7907
Ribera Alta del Ebro	4.362	0,201	0,174	-0,026	46	2.054	0,20	0,08	-0,12	98
Ribera Baja del Ebro	2.531	0,394	0,101	-0,293	156	681	0,39	0,03	-0,37	579
Sierra de Albarracín	209	0,059	0,008	-0,050	280	17	0,06	0,00	-0,06	3534
Sobrarbe	152	0,044	0,006	-0,038	292	9	0,04	0,00	-0,04	5107
Somontano de Barbastro	5.828	0,257	0,233	-0,024	44	2.627	0,26	0,11	-0,15	98
Tarazona y El Moncayo	793	0,070	0,032	-0,039	89	328	0,07	0,01	-0,06	215
Valdejalón	1.498	0,199	0,060	-0,139	133	478	0,20	0,02	-0,18	416
Zaragoza	6.869	0,695	0,275	-0,420	101	2.510	0,70	0,10	-0,59	277
Total	109.043	8,122	4,362	-3,760	74	44.723	8,12	1,79	-6,33	182

Cuadro 6. 16. Resultados de “Modernización de los sistemas de regadío por comarca”.

Comarcas	Sin interacción					Con interacción				
	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Alto Gállego	87	0,01	0,003	-0,01	151	46	0,02	0,002	-0,01	355
Andorra Sierra de Arcos	92	0,03	0,004	-0,03	377	45	0,04	0,002	-0,04	890
Aranda	64	0,01	0,003	-0,01	203	32	0,02	0,001	-0,02	537
Bajo Aragón	5.183	-0,52	0,207	0,72	-100	2.559	-0,26	0,102	0,36	-101
Bajo Aragón Caspe	3.528	-0,33	0,141	0,48	-95	1.729	-0,11	0,069	0,18	-63
Bajo Cinca	4.150	-0,34	0,166	0,51	-82	1.997	-0,12	0,080	0,20	-61
Bajo Martín	1.034	0,30	0,041	-0,26	290	498	0,36	0,020	-0,34	723
Campo de Belchite	865	0,39	0,035	-0,36	453	453	0,45	0,018	-0,43	994
Campo de Borja	3.721	0,47	0,149	-0,32	127	2.157	0,65	0,086	-0,56	300
Campo de Cariñena	310	-0,18	0,012	0,19	-575	288	-0,16	0,012	0,17	-551
Campo de Daroca	671	0,19	0,027	-0,17	288	290	0,23	0,012	-0,21	779
Cinca Medio	4.073	0,64	0,163	-0,48	157	1.789	0,87	0,072	-0,79	484
Cinco Villas	17.520	6,83	0,701	-6,13	390	8.636	7,59	0,345	-7,24	879
Comunidad de Calatayud	2.364	-0,62	0,095	0,71	-262	1.247	-0,49	0,050	0,54	-392
Comunidad de Teruel	2.919	0,64	0,117	-0,53	221	1.298	0,77	0,052	-0,72	595
Cuencas Mineras	189	0,08	0,008	-0,07	400	85	0,08	0,003	-0,08	997
Gúdar Javalambre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Hoya de Huesca	6.581	1,85	0,263	-1,59	282	3.098	2,16	0,124	-2,04	699
Jiloca	2.751	0,45	0,110	-0,34	164	1.211	0,58	0,048	-0,53	482
La Jacetania	322	0,13	0,013	-0,12	411	150	0,16	0,006	-0,16	1079
La Litera	1.407	0,08	0,056	-0,02	57	643	0,14	0,026	-0,12	225
La Ribagorza	232	0,06	0,009	-0,05	275	105	0,09	0,004	-0,08	813
Los Monegros	18.813	2,46	0,753	-1,71	131	8.740	3,30	0,350	-2,95	378
Maestrazgo	120	0,04	0,005	-0,04	343	59	0,06	0,002	-0,06	1020
Matarraña	163	-0,03	0,007	0,04	-208	95	-0,03	0,004	0,04	-328
Ribera Alta del Ebro	5.360	1,03	0,214	-0,82	193	2.806	1,25	0,112	-1,14	447
Ribera Baja del Ebro	3.328	1,31	0,133	-1,17	393	1.714	1,43	0,069	-1,36	835
Sierra de Albarracín	56	0,01	0,002	-0,01	224	27	0,01	0,001	-0,01	555
Sobrarbe	150	0,05	0,006	-0,05	344	84	0,07	0,003	-0,06	776
Somontano de Barbastro	2.520	0,43	0,101	-0,33	170	1.170	0,56	0,047	-0,52	481
Tarazona y El Moncayo	1.804	0,45	0,072	-0,38	248	822	0,55	0,033	-0,52	669
Valdejalón	1.938	0,02	0,078	0,06	10	994	0,09	0,040	-0,05	94
Zaragoza	7.140	1,52	0,286	-1,23	212	3.925	2,56	0,157	-2,40	651
Total	99.457	18,27	3,978	-14,29	184	48.792	22,93	1,952	-20,98	470

Cuadro 6. 17. Resultados de “Reducción de laboreo por comarca”.

Comarcas	Sin interacción					Con interacción				
	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Alto Gállego	1.523	-0,05	0,06	0,11	-31	1.523	-0,05	0,06	0,11	-31
Andorra Sierra de Arcos	2.447	-0,07	0,10	0,17	-29	2.444	-0,07	0,10	0,17	-29
Aranda	978	-0,03	0,04	0,07	-30	977	-0,03	0,04	0,07	-30
Bajo Aragón	8.749	-0,21	0,35	0,56	-23	8.275	-0,21	0,33	0,54	-25
Bajo Aragón Caspe	4.782	-0,14	0,19	0,33	-28	4.679	-0,14	0,19	0,32	-29
Bajo Cinca	15.204	-0,35	0,61	0,95	-23	13.603	-0,35	0,54	0,89	-25
Bajo Martín	5.315	-0,16	0,21	0,37	-30	5.305	-0,16	0,21	0,37	-30
Campo de Belchite	12.706	-0,39	0,51	0,90	-31	12.705	-0,39	0,51	0,90	-31
Campo de Borja	5.989	-0,15	0,24	0,39	-26	5.728	-0,15	0,23	0,38	-27
Campo de Cariñena	6.103	-0,19	0,24	0,44	-31	6.103	-0,19	0,24	0,44	-31
Campo de Daroca	15.350	-0,46	0,61	1,08	-30	15.322	-0,46	0,61	1,08	-30
Cinca Medio	12.361	-0,28	0,49	0,77	-22	10.676	-0,28	0,43	0,70	-26
Cinco Villas	48.533	-1,35	1,94	3,29	-28	46.016	-1,35	1,84	3,19	-29
Comunidad de Calatayud	14.243	-0,41	0,57	0,98	-29	14.119	-0,41	0,56	0,98	-29
Comunidad de Teruel	16.934	-0,49	0,68	1,17	-29	16.723	-0,49	0,67	1,16	-29
Cuencas Mineras	5.856	-0,18	0,23	0,41	-30	5.854	-0,18	0,23	0,41	-30
Gúdar Javalambre	62	-0,002	0,002	0,004	-32	62	0,00	0,00	0,00	-32
Hoya de Huesca	45.139	-1,27	1,81	3,08	-28	43.844	-1,27	1,75	3,03	-29
Jiloca	22.547	-0,65	0,90	1,55	-29	22.327	-0,65	0,89	1,54	-29
La Jacetania	6.016	-0,18	0,24	0,43	-31	6.016	-0,18	0,24	0,43	-31
La Litera	16.615	-0,40	0,66	1,06	-24	14.683	-0,40	0,59	0,99	-27
La Ribagorza	6.532	-0,19	0,26	0,46	-30	6.526	-0,19	0,26	0,46	-30
Los Monegros	64969	-1,50	2,60	4,10	-23	58.405	-1,50	2,34	3,84	-26
Maestrazgo	1.336	-0,04	0,05	0,09	-30	1.336	-0,04	0,05	0,09	-30
Matarraña	1.160	-0,03	0,05	0,08	-29	1.160	-0,03	0,05	0,08	-29
Ribera Alta del Ebro	8.088	-0,18	0,32	0,50	-22	7.270	-0,18	0,29	0,47	-24
Ribera Baja del Ebro	12.014	-0,35	0,48	0,83	-29	11.642	-0,35	0,47	0,82	-30
Sierra de Albarracín	1.395	-0,04	0,06	0,10	-31	1.390	-0,04	0,06	0,10	-31
Sobrarbe	1.412	-0,04	0,06	0,10	-31	1.409	-0,04	0,06	0,10	-31
Somontano de Barbastro	16.960	-0,42	0,68	1,10	-25	15.591	-0,42	0,62	1,05	-27
Tarazona y El Moncayo	3.393	-0,09	0,14	0,23	-28	3.290	-0,09	0,13	0,23	-29
Valdejalón	8.440	-0,24	0,34	0,58	-29	8.232	-0,24	0,33	0,57	-30
Zaragoza	21.377	-0,58	0,86	1,43	-27	20.174	-0,58	0,81	1,38	-29
Total	414.528	-11,13	16,58	27,72	-27	393.411	-11,13	15,74	26,87	-28

Cuadro 6. 18. Resultados de “Reducción de proteína en la dieta de porcino por comarca”.

Comarcas	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Alto Gállego	464	-0,01	0,02	0,02	-12,8
Andorra Sierra de Arcos	3.503	-0,04	0,14	0,18	-12,8
Aranda	763	-0,01	0,03	0,04	-12,8
Bajo Aragón	17.719	-0,23	0,71	0,94	-12,8
Bajo Aragón Caspe	23.639	-0,30	0,95	1,25	-12,8
Bajo Cinca	38.717	-0,49	1,55	2,04	-12,8
Bajo Martín	7.108	-0,09	0,28	0,38	-12,8
Campo de Belchite	8.316	-0,11	0,33	0,44	-12,8
Campo de Borja	14.219	-0,18	0,57	0,75	-12,8
Campo de Cariñena	2.594	-0,03	0,10	0,14	-12,8
Campo de Daroca	4.940	-0,06	0,20	0,26	-12,8
Cinca Medio	31.499	-0,40	1,26	1,66	-12,8
Cinco Villas	75.995	-0,97	3,04	4,01	-12,8
Comunidad de Calatayud	4.778	-0,06	0,19	0,25	-12,8
Comunidad de Teruel	9.758	-0,12	0,39	0,51	-12,8
Cuencas Mineras	2.156	-0,03	0,09	0,11	-12,8
Gúdar Javalambre	1.046	-0,01	0,04	0,06	-12,8
Hoya de Huesca	33.831	-0,43	1,35	1,79	-12,8
Jiloca	18.322	-0,23	0,73	0,97	-12,8
La Jacetania	1.371	-0,02	0,05	0,07	-12,8
La Litera	45.927	-0,59	1,84	2,42	-12,8
La Ribagorza	15.764	-0,20	0,63	0,83	-12,8
Los Monegros	94.026	-1,20	3,76	4,96	-12,8
Maestrazgo	5.510	-0,07	0,22	0,29	-12,8
Matarraña	16.626	-0,21	0,67	0,88	-12,8
Ribera Alta del Ebro	7.663	-0,10	0,31	0,40	-12,8
Ribera Baja del Ebro	13.281	-0,17	0,53	0,70	-12,8
Sierra de Albarracín	692	-0,01	0,03	0,04	-12,8
Sobrarbe	2.541	-0,03	0,10	0,13	-12,8
Somontano de Barbastro	21.089	-0,27	0,84	1,11	-12,8
Tarazona y El Moncayo	2.779	-0,04	0,11	0,15	-12,8
Valdejalón	5.846	-0,07	0,23	0,31	-12,8
Zaragoza	10.982	-0,14	0,44	0,58	-12,8
Total	543.462	-6,94	21,74	28,68	-12,8

Cuadro 6. 19. Resultados de “Cultivos cubierta para herbáceos por comarca”.

Comarcas	Sin interacción					Con interacción				
	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Alto Gállego	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Andorra Sierra de Arcos	6	-0,0008	0,0002	0,0011	-139	4	0,0003	0,0001	-0,0002	85
Aranda	0	-0,0001	0,0000	0,0001	-139	0	0,0000	0,00001	-0,00001	85
Bajo Aragón	941	-0,13	0,04	0,17	-139	556	0,0471	0,02	-0,02	85
Bajo Aragón Caspe	205	-0,03	0,01	0,04	-139	121	0,0103	0,005	-0,01	85
Bajo Cinca	2237	-0,30	0,09	0,39	-133	1.199	0,0791	0,05	-0,03	66
Bajo Martín	20	0,00	0,00	0,00	-139	12	0,0010	0,0005	-0,0005	85
Campo de Belchite	2	0,00	0,00	0,00	-139	1	0,0001	0,00005	-0,0001	85
Campo de Borja	517	-0,07	0,02	0,09	-139	305	0,0259	0,01	-0,01	85
Campo de Cariñena	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Campo de Daroca	54	-0,01	0,002	0,01	-139	32	0,0027	0,001	0,00	85
Cinca Medio	2270	-0,30	0,09	0,39	-132	1.201	0,0761	0,05	-0,03	63
Cinco Villas	3311	-0,44	0,13	0,57	-132	1.737	0,1070	0,07	-0,04	62
Comunidad de Calatayud	245	-0,03	0,01	0,04	-139	145	0,0123	0,01	-0,01	85
Comunidad de Teruel	419	-0,06	0,02	0,07	-139	247	0,0210	0,01	-0,01	85
Cuencas Mineras	4	0,00	0,00	0,00	-139	3	0,0002	0,0001	-0,0001	85
Gúdar Javalambre	0	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	
Hoya de Huesca	1829	-0,24	0,07	0,32	-133	984	0,0657	0,04	-0,03	67
Jiloca	438	-0,06	0,02	0,08	-139	259	0,0219	0,01	-0,01	85
La Jacetania	0	0,00	0,00	0,00		0	0	0	0	
La Litera	2451	-0,32	0,10	0,42	-131	1268	0,0744	0,05	-0,02	59
La Ribagorza	12	0,00	0,00	0,00	-139	7	0,0006	0,0003	-0,0003	85
Los Monegros	9651	-1,29	0,39	1,68	-134	5.261	0,3652	0,21	-0,15	69
Maestrazgo	0	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	
Matarraña	0	-0,0001	0,00002	0,0001	-139	0	0	0	0	85
Ribera Alta del Ebro	1349	-0,18	0,05	0,24	-136	761	0,0579	0,03	-0,03	76
Ribera Baja del Ebro	483	-0,06	0,02	0,08	-132	252	0,0153	0,01	-0,01	61
Sierra de Albarracín	10	0,00	0,00	0,00	-139	6	0,0005	0,0002	-0,0003	85
Sobrarbe	5	0,00	0,00	0,00	-139	3	0,0003	0,0001	-0,0001	85
Somontano de Barbastro	1840	-0,24	0,07	0,32	-132	973	0,0615	0,04	-0,02	63
Tarazona y El Moncayo	205	-0,03	0,01	0,04	-139	121	0,0103	0,00	-0,01	85
Valdejalón	320	-0,04	0,01	0,06	-135	177	0,0128	0,01	-0,01	72
Zaragoza	1721	-0,23	0,07	0,30	-133	930	0,0629	0,04	-0,03	68
Total	30548	-4,08	1,22	5,31	-134	16.564	1,1326	0,66	-0,47	68

Cuadro 6. 20. Resultados de “Cultivos cubierta leñosos por comarca”.

Comarcas	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Alto Gállego	1	0,0001	0,0001	-0,000002	42
Andorra Sierra de Arcos	3.808	0,17	0,15	-0,02	44
Aranda	3.079	0,14	0,12	-0,01	45
Bajo Aragón	21.780	0,98	0,87	-0,10	45
Bajo Aragón Caspe	11.428	0,51	0,46	-0,05	45
Bajo Cinca	3.299	0,15	0,13	-0,02	45
Bajo Martín	4.467	0,20	0,18	-0,02	45
Campo de Belchite	2.184	0,10	0,09	-0,01	44
Campo de Borja	10.815	0,47	0,43	-0,04	43
Campo de Cariñena	13.977	0,59	0,56	-0,03	42
Campo de Daroca	3.563	0,16	0,14	-0,01	44
Cinca Medio	458	0,02	0,02	0,00	45
Cinco Villas	1.801	0,08	0,07	-0,01	45
Comunidad de Calatayud	15.658	0,69	0,63	-0,06	44
Comunidad de Teruel	95	0,00	0,00	0,00	44
Cuencas Mineras	1.086	0,05	0,04	0,00	44
Gúdar Javalambre	0	0,00	0,00	0,00	0
Hoya de Huesca	7.362	0,33	0,29	-0,04	45
Jiloca	1.498	0,07	0,06	-0,01	44
La Jacetania	104	0,005	0,004	-0,0005	45
La Litera	2.020	0,09	0,08	-0,01	45
La Ribagorza	1.267	0,06	0,05	-0,01	44
Los Monegros	1.713	0,08	0,07	-0,01	44
Maestrazgo	1.071	0,05	0,04	0,00	45
Matarraña	24.328	1,09	0,97	-0,12	45
Ribera Alta del Ebro	72	0,00	0,00	0,00	44
Ribera Baja del Ebro	155	0,01	0,01	0,00	45
Sierra de Albarracín	3	0,00012	0,0001	-0,00001	45
Sobrarbe	440	0,02	0,02	-0,002	45
Somontano de Barbastro	10.081	0,44	0,40	-0,04	44
Tarazona y El Moncayo	989	0,04	0,04	0,00	45
Valdejalón	6.739	0,30	0,27	-0,03	44
Zaragoza	676	0,03	0,03	-0,003	44
Total	156.019	6,90	6,24	-0,66	44

Cuadro 6. 21. Resultados de “Adición de lípidos en la dieta de ovino y bovino por comarca”.

Comarcas	Ovino					Bovino				
	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Alto Gállego	637	1,8	0,0	-1,7	2768	547	0,31	0,02	-0,29	572
Andorra Sierra de Arcos	597	1,7	0,0	-1,6	2768	14	0,01	0,00	-0,01	572
Aranda	409	1,1	0,0	-1,1	2768	0	0,00	0,00	0,00	
Bajo Aragón	2882	8,0	0,1	-7,9	2768	921	0,51	0,04	-0,47	554
Bajo Aragón Caspe	174	0,5	0,0	-0,5	2768	132	0,07	0,01	-0,07	555
Bajo Cinca	1034	2,9	0,0	-2,8	2768	4299	2,31	0,17	-2,13	537
Bajo Martín	392	1,1	0,0	-1,1	2768	1182	0,68	0,05	-0,63	572
Campo de Belchite	1099	3,0	0,0	-3,0	2768	428	0,24	0,02	-0,22	550
Campo de Borja	991	2,7	0,0	-2,7	2768	2027	1,14	0,08	-1,06	562
Campo de Cariñena	785	2,2	0,0	-2,1	2768	42	0,02	0,00	-0,02	572
Campo de Daroca	2108	5,8	0,1	-5,7	2768	145	0,08	0,01	-0,08	572
Cinca Medio	649	1,8	0,0	-1,8	2768	4576	2,49	0,18	-2,31	544
Cinco Villas	1937	5,4	0,1	-5,3	2768	2185	0,99	0,09	-0,90	454
Comunidad de Calatayud	3377	9,3	0,1	-9,2	2768	401	0,20	0,02	-0,19	505
Comunidad de Teruel	3230	8,9	0,1	-8,8	2768	481	0,24	0,02	-0,22	504
Cuencas Mineras	1976	5,5	0,1	-5,4	2768	226	0,13	0,01	-0,12	572
Gúdar Javalambre	3789	10,5	0,2	-10,3	2768	1148	0,66	0,05	-0,61	572
Hoya de Huesca	4059	11,2	0,2	-11,1	2768	2440	1,33	0,10	-1,23	545
Jiloca	2785	7,7	0,1	-7,6	2768	526	0,30	0,02	-0,28	572
La Jacetania	1162	3,2	0,0	-3,2	2768	914	0,52	0,04	-0,49	572
La Litera	1631	4,5	0,1	-4,4	2768	12523	6,57	0,50	-6,07	524
La Ribagorza	2843	7,9	0,1	-7,8	2768	2766	1,49	0,11	-1,38	540
Los Monegros	2339	6,5	0,1	-6,4	2768	3471	1,79	0,14	-1,65	517
Maestrazgo	1378	3,8	0,1	-3,8	2768	929	0,53	0,04	-0,49	572
Matarraña	1668	4,6	0,1	-4,5	2768	511	0,29	0,02	-0,27	572
Ribera Alta del Ebro	1643	4,5	0,1	-4,5	2768	1873	0,94	0,07	-0,87	504
Ribera Baja del Ebro	764	2,1	0,0	-2,1	2768	1042	0,58	0,04	-0,54	561
Sierra de Albarracín	1143	3,2	0,0	-3,1	2768	79	0,05	0,00	-0,04	572
Sobrarbe	1574	4,4	0,1	-4,3	2768	2427	1,37	0,10	-1,27	563
Somontano de Barbastro	2848	7,9	0,1	-7,8	2768	1746	0,97	0,07	-0,90	557
Tarazona y El Moncayo	728	2,0	0,0	-2,0	2768	56	0,03	0,00	-0,03	572
Valdejalón	2765	7,7	0,1	-7,5	2768	596	0,34	0,02	-0,32	572
Zaragoza	1836	5,1	0,1	-5,0	2768	2006	1,03	0,08	-0,95	515
Total	57229	158,4	2,3	-156,1	2768	52659	28,24	2,11	-26,13	536

Cuadro 6. 22. Resultados de “El ajuste de la fertilización mineral por tipo de cultivo”.

Cultivos	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Cebada	146.492	-20,42	5,86	26,28	-139
Maíz	40.259	-3,98	1,61	5,59	-99
Alfalfa	579	-0,03	0,02	0,06	-59
Trigo	36.589	-4,91	1,46	6,37	-134
Arroz	3.994	-0,47	0,16	0,63	-119
Guisante	1.382	-0,18	0,06	0,23	-128
Cebolla	135	-0,02	0,01	0,02	-142
Melocotonero	11.422	-1,27	0,46	1,73	-111
Olivar	18.290	-2,45	0,73	3,18	-134
Viñedo	7.077	-0,96	0,28	1,24	-136
Almendro	23.269	-3,17	0,93	4,10	-136
Cerezo	2.750	-0,31	0,11	0,42	-112
Manzano	1.939	-0,22	0,08	0,29	-111
Total	294.176	-38,39	11,77	50,16	-130

Cuadro 6. 23. Resultados de “Sustitución de la fertilización mineral por orgánica por tipo de cultivo”.

Cultivos	Sin interacción					Con interacción				
	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Cebada	115.071	-4,63	4,60	9,23	-40	66.729	-2,68	2,67	5,35	-40
Maíz	100.570	-2,93	4,02	6,95	-29	87.284	-2,59	3,49	6,08	-29
Alfalfa	16.779	-0,49	0,67	1,16	-29	16.588	-0,48	0,66	1,15	-29
Trigo	43.260	-1,67	1,73	3,40	-38	31.185	-1,19	1,25	2,44	-38
Arroz	3.877	-0,13	0,16	0,29	-34	2.559	-0,09	0,10	0,19	-34
Guisante	1.543	-0,06	0,06	0,12	-38	1.087	-0,04	0,04	0,08	-38
Cebolla	674	-0,03	0,03	0,05	-38	630	-0,02	0,03	0,05	-38
Melocotonero	6.853	-0,22	0,27	0,49	-32	3.084	-0,10	0,12	0,22	-32
Olivar	8.969	-0,34	0,36	0,70	-38	2.933	-0,11	0,12	0,22	-36
Viñedo	6.172	-0,23	0,25	0,47	-37	3.837	-0,13	0,15	0,29	-35
Almendro	8.398	-0,33	0,34	0,66	-39	719	-0,03	0,03	0,06	-40
Cerezo	1.193	-0,04	0,05	0,09	-32	286	-0,01	0,01	0,02	-32
Manzano	1.416	-0,05	0,06	0,10	-32	776	-0,02	0,03	0,06	-32
Total	314.775	-11,12	12,59	23,71	-35	217.697	-7,49	8,71	16,20	-34

Cuadro 6. 24. Resultados de “La rotación de los cultivos con leguminosas por tipo de cultivo”.

Cultivos	Sin interacción					Con interacción				
	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)	RP (tCO ₂ e)	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO ₂ e)
Trigo	114.169	-4,86	4,57	9,43	-43	99.133	-2,69	3,97	6,66	-27
Cebada	278.792	-15,80	11,15	26,95	-57	216.590	-6,66	8,66	15,32	-31
Total	392.960	-20,66	15,72	36,38	-53	315.723	-9,35	12,63	21,98	-30

Cuadro 6. 25. Resultados de “Modernización de los sistemas de regadío por tipo de cultivo”.

Cultivos	Sin interacción					Con interacción				
	RP (tCO _{2e})	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO _{2e})	RP (tCO _{2e})	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE (€/tCO _{2e})
Cebada	32.502	9,79	1,30	-8,49	301	12.894	11,90	0,52	-11,38	923
Maíz	33.513	-0,41	1,34	1,76	-12	15.494	0,81	0,62	-0,19	52
Alfalfa	10.934	4,24	0,44	-3,80	388	7.757	4,58	0,31	-4,27	590
Trigo	14.049	8,53	0,56	-7,97	607	6.798	8,85	0,27	-8,57	1301
Arroz	1.019	1,24	0,04	-1,20	1220	716	1,31	0,03	-1,29	1835
Guisante	336	-0,07	0,01	0,08	-209	338	-0,05	0,01	0,07	-158
Cebolla	2.860	-4,35	0,11	4,46	-1520	1.820	-4,12	0,07	4,19	-2264
Melocotonero	1.636	1,69	0,07	-1,62	1033	1.199	1,83	0,05	-1,78	1527
Olivar	871	-0,64	0,03	0,67	-730	1.149	-0,57	0,05	0,62	-500
Viñedo	1.080	0,002	0,04	0,04	1	131	0,12	0,01	-0,11	899
Almendro	396	0,18	0,02	-0,16	453	158	0,22	0,01	-0,21	1372
Cerezo	261	-1,94	0,01	1,95	688	339	-1,93	0,01	1,94	-5686
Manzano	99.457	18,27	3,98	-14,29	184	48.792	22,93	1,95	-20,98	470
Total	32.502	9,79	1,30	-8,49	301	12.894	11,90	0,52	-11,38	923

Cuadro 6. 26. Resultados de “Reducción de laboreo por tipo de cultivo”.

Cultivos	Sin interacción					Con interacción				
	RP tCO _{2e}	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE €/tCO _{2e}	RP tCO _{2e}	CP (M€)	BA (M€)	BS (M€)	CE €/tCO _{2e}
Trigo secano	85.188	-2,75	3,40	6,16	-32	85.188	-2,75	3,41	6,16	-32
Cebada secano	176.983	-5,13	7,08	12,21	-29	176.983	-5,13	7,08	12,21	-29
Cebada regadía	45.503	-1,62	1,82	3,44	-36	45.503	-1,62	1,82	3,44	-36
Maíz regadío	85.533	-1,12	3,42	4,55	-13	64.417	-1,12	2,58	3,70	-17
Trigo regadío	21.320	-0,51	0,85	1,37	-24	21.320	-0,51	0,85	1,37	-24
Total	414.528	-11,13	16,58	27,72	-27	393.411	-11,13	15,74	26,87	-28

Cuadro 6. 27. Resultados del segundo escenario

Segundo escenario	Potencial de reducción (MtCO _{2e})	Coste privado (M€)
Ajuste de la fertilización mineral	0,3	-38
Sustitución de la fertilización mineral por orgánica	0,3	-11
Laboreo reducido	0,4	-11
Emisiones GEI en 2050 sin implementación de medidas	5,2	
Emisiones GEI en 2050 con la implementación de medidas	4,2	-60

Cuadro 6. 28. Resultados del tercer escenario

Tercer escenario	Potencial de Reducción (MtCO ₂ e)	Coste privado (M€)
Ajuste de la fertilización mineral	0,3	-38
Sustitución de la fertilización mineral por orgánica	0,3	-11
Laboreo reducido	0,4	-11
Cultivos cubierta por herbáceos	0,03	-4
Rotación de cultivos con leguminosas	0,42	-22
Cultivos cubierta por leñosos	0,16	7
Inhibidores de nitrificación	0,11	8
Modernización del sistema de riego	0,09	16
Reducción de proteína en dieta de porcino	0,86	-11
Plantas de tratamiento de estiércol	0,08	11
Adición de lípidos en dieta bovino	0,05	28
Adición de lípidos en dieta ovino	0,06	158
Cambio manejo forestal	0,66	-101
Emisiones GEI en 2050 sin implementación de medidas	5,2	
Emisiones GEI en 2050 con la implementación de todas las medidas	1,7	31