



Facultat de ciències

Memòria del Treball de Fi de Grau

## **Efectes de la intensitat de la llaurada sobre les propietats fisicoquímiques del sòl i el desenvolupament de diferents cultius**

---

Estudiant: Maria Rossell i Triadó

Correu electrònic: [mariarosselltriado@gmail.com](mailto:mariarosselltriado@gmail.com)

Doble Grau en Biologia i Ciències Ambientals

Tutor acadèmic: Moritz Hallama

Correu electrònic: [moritz.hallama@udg.edu](mailto:moritz.hallama@udg.edu)

Cotutor: Joan Romanyà

Correu electrònic: [jromanya@ub.edu](mailto:jromanya@ub.edu)

Institució: Universitat de Barcelona

Data de dipòsit de la memòria a través de la plataforma de TFG: 05/07/2024

## ÍNDEX

AGRAÏMENTS.....	ii
RESUM.....	iii
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
REFLEXIONS.....	vi
1 INTRODUCCIÓ.....	7
1.1 Passat i present de l'agricultura .....	7
1.2 La llaurada.....	8
1.3 La qualitat del sòl.....	10
1.4 L'adaptació dels cultius .....	12
1.5 El Pallars Jussà.....	12
2 OBJECTIVES AND HYPOTHESIS.....	14
3 MATERIALS I MÈTODES.....	14
3.1 Lloc.....	14
3.2 Clima i sòls.....	15
3.3 Disseny experimental.....	16
3.4 Anàlisi dels sòls .....	17
3.5 Anàlisi foliar .....	21
3.6 Anàlisi estadística.....	23
4 RESULTATS.....	24
4.1 Resultats dels sòls .....	24
4.2 Resultats de les fulles.....	26
5 DISCUSSIÓ .....	33
5.1 Canvis en la qualitat del sòl a curt termini.....	33
5.2 Resposta dels cultius a la intensitat de llaurada .....	35
6 CONCLUSION .....	37
7 BIBLIOGRAFIA.....	38

## **AGRAÏMENTS**

Aquest treball no hauria estat possible sense l'ajuda dels meus tutors, el Dr. Moritz Hallama i el Dr. Joan Romanyà. M'agradaria agrair també a totes les persones del departament d'Edafologia de la Universitat de Barcelona amb les que ens hem trobat en aquest camí, en especial a la Neus Solà, amb qui he compartit les sortides de camp i les hores al laboratori. També a la meva família, amics/es i companys/es de classe, pels ànims que m'han donat al llarg de tot el procés.

## RESUM

Els models d'agricultura convencional més estesos al món estan basats en assolir la màxima producció, i tenen moltes mancances en termes de conservació de la biodiversitat, salut del sòl, etc. A més, són sistemes fràgils i poc sostenibles davant la situació de canvi climàtic actual. L'agroecologia és la ciència que busca crear sistemes resistents i menys contaminants a partir d'entendre el funcionament dels sistemes naturals. La salut del sòl és un paràmetre sovint oblidat però indispensable per aconseguir uns cultius rendibles. Un sòl amb una bona salut es caracteritza per tenir una bona estructura i una comunitat microbiana sana i, per tant, pot funcionar com un sistema vivent capaç de regular-se. La llaurada és un factor que pot afectar a la salut del sòl. Dins aquest marc s'ha realitzat un estudi al Pallars Jussà que pretén comparar cinc cultius poc implantats a la comarca en tres intensitats de llaurada diferents (sembra directa, tombat i estripat). A l'estudi s'empren dos cultius de lleguminoses (*Lens culinaris* i *Vicia faba*), dos cultius de cereals (*Hordeum distichon* L. i *Triticum spelta*) i un policultiu (*Vicia sativa* amb *Avena sativa*), tots amb gestió ecològica. És interessant fer aquest estudi al Pallars Jussà, ja que és una zona amb molt potencial per ser autosuficient i sostenible davant el canvi climàtic i les necessitats de la població.

S'han estudiat els efectes de la llaurada sobre les propietats físico-químiques del sòl a curt termini i la resposta dels cinc cultius davant les diferents intensitats de llaurada. Els resultats mostren que la llaurada té efectes sobre les propietats del sòl, fent-lo més esponjat i amb més capacitat d'infiltració de l'aigua. No hi ha una tendència clara sobre l'efecte que té sobre les propietats químiques, però sí que s'observa que els sòls sense llaurada tenen una comunitat microbiana més activa a l'hora de convertir nutrients perquè siguin aprofitables per les plantes.

La llaurada també té efectes sobre el creixement dels cultius, ja que en sòls llaurats les plantes creixen més i amb menys estrès. Tot i això, no hi ha efecte directe de la llaurada sobre la captació de nitrogen atmosfèric de les lleguminoses. Tampoc hi ha cap espècie que mostri un augment de la seva productivitat en un règim de llaurada específic.

## RESUMEN

Los modelos de agricultura convencional más extendidos en el mundo están basados en alcanzar la máxima producción y tienen muchas carencias en términos de conservación de la biodiversidad, salud del suelo, etc. Además, son sistemas frágiles y poco sostenibles frente a la situación de cambio climático actual. La agroecología es la ciencia que quiere crear sistemas resistentes y menos contaminantes a partir de entender el funcionamiento de los sistemas naturales. La salud del suelo es un parámetro olvidado a menudo pero indispensable para conseguir unos cultivos rentables. Un suelo con una buena salud se caracteriza por tener una buena estructura y una comunidad microbiana sana y, por tanto, puede funcionar como un sistema viviente capaz de regularse. La labrada es un factor que puede afectar a la salud del suelo. Se ha realizado un estudio en el Pallars Jussà que pretende comparar cinco cultivos poco implantados en la comarca en tres intensidades de labranza diferentes (sin labranza, labranza de intensidad media y labranza de alta intensidad). En el estudio se emplean dos cultivos de leguminosas (*Lens culinaris* y *Vicia faba*), dos cultivos de cereales (*Hordeum distichon* L. y *Triticum spelta*) y un policultivo (*Vicia sativa* con *Avena sativa*), todos ellos con gestión ecológica. Es interesante realizar este estudio en el Pallars Jussà, porque es una zona con mucho potencial para ser autosuficiente y sostenible ante el cambio climático y las necesidades de la población.

Se han estudiado los efectos de la intensidad de labranza sobre las propiedades físico-químicas del suelo a corto plazo y la respuesta de los cinco cultivos ante las diferentes intensidades de laboreo. Los resultados muestran que la labranza tiene efectos sobre las propiedades del suelo, haciéndolo más aireado y con mayor capacidad de infiltración del agua. No existe una tendencia clara sobre su efecto sobre las propiedades químicas, pero sí se observa que los suelos no labrados tienen una comunidad microbiana más activa a la hora de convertir nutrientes para que sean aprovechables por las plantas.

El labrado también tiene efectos sobre el crecimiento de los cultivos, en suelos labrados las plantas crecen más y experimentan menos estrés. Sin embargo, no hay efecto directo de la labor sobre la captación de nitrógeno atmosférico de las leguminosas. Tampoco existe ninguna especie de planta que muestre un aumento de su productividad en un régimen de labor específico.

## ABSTRACT

The most widespread models of conventional agriculture worldwide are based on achieving maximum production but have many deficiencies in terms of biodiversity conservation, soil health, etc. Moreover, these systems are fragile and unsustainable in the face of the current climate change situation. Agroecology is the science aimed at creating resilient and less polluting systems by understanding the functioning of natural systems. Soil health is often an overlooked parameter but is essential for achieving profitable crops. A soil with good health is characterized by good structure and a healthy microbial community, thus functioning as a living system capable of self-regulation. Tillage is a factor that can affect soil health. A study was conducted in Pallars Jussà comparing five crops that are not widely established in the region under three different tillage intensities (no tillage, medium intensity tillage, and high intensity tillage). The study includes two legume crops (*Lens culinaris* and *Vicia faba*), two cereal crops (*Hordeum distichon* L. and *Triticum spelta*), and one polyculture (*Vicia sativa* with *Avena sativa*), all managed ecologically. This study is particularly relevant in Pallars Jussà because this region has the potential to become self-sufficient and sustainable in response to climate change and population needs.

The effects of tillage intensity on the soil's physicochemical properties in the short term and the response of the five crops to different tillage intensities were studied. The results show that tillage affects soil properties, making it more aerated and with greater water infiltration capacity. There is no clear trend regarding its effect on chemical properties, but it is observed that untilled soils have a more active microbial community in converting nutrients into forms usable by plants.

Tillage also affects crop growth; plants in tilled soils grow more and experience less stress. However, there is no direct effect of tillage on the atmospheric nitrogen fixation of legumes. Nor does any plant species show increased productivity under a specific tillage regime.

## **REFLEXIONS**

### **Reflexió de perspectiva de gènere**

El món de l'agricultura i la pagesia està molt marcat per prejudicis relacionats amb el gènere. En el passat, les dones rurals han estat marginades i discriminades, i això ha fet que, malgrat el seu rol indispensable, no poguessin accedir a educació, terres, tecnologia, etc. Les noves tècniques agroecològiques volen veure des d'una perspectiva diferent els rols de gènere dins l'agricultura. Això permet a tothom sentir-se més còmode dins d'aquest món, aportar noves idees, prendre decisions i generar relacions sanes amb l'ofici. D'aquesta manera es pot impulsar que el desenvolupament rural sigui sostenible i beneficiós per tota la comunitat.

### **Reflexió de sostenibilitat**

Actualment, la dinàmica de l'agricultura convencional està enfocada a aconseguir la màxima producció sense tenir en compte res més. Aquest model és perjudicial pels ecosistemes, i sobretot per la salut del sòl, ja que es basa en la llaurada intensiva i l'aplicació de químics. És necessari fer recerca per tal d'obtenir un model d'agricultura resilient al canvi climàtic, adaptat al territori i fàcil d'aplicar, per tal de facilitar la tasca als agricultors. Aquest procés ha de tenir en compte la salut del sòl, la biodiversitat i conservació dels ecosistemes, la viabilitat dels models d'agricultura, la innovació i recerca i els aspectes socials i ètics.

### **Reflexió ètica**

Els recursos per fer aquest estudi són mínims. El camp de conreu que s'utilitza és un camp d'un agricultor de la zona amb gestió ecològica, que el cedeix per l'estudi i després n'aprofita els cultius que hi creixen. Per tant, no hi ha canvis en els usos del sòl ni tampoc desapropietament energètic i dels cultius. A l'hora de dissenyar experiments, cal tenir en compte que estiguin ben fets, per tal de no haver-los de repetir i no gastar recursos que es podrien aprofitar per altres qüestions.

Una agricultura èticament responsable és l'agricultura ecològica, que permet respectar el medi ambient i a la vegada els drets humans. Aquest projecte també promou la sobirania alimentària, produint aliments de proximitat que puguin ser accessibles per les persones de la comarca.

## 1 INTRODUCCIÓ

L'agricultura actual es basa en assolir la màxima producció i treure el màxim rendiment dels recursos dels quals es disposen. Per bé que aquest sistema permet, generalment, alimentar a la població, és molt fàcil que col·lapsi. Els humans hem creat una agricultura que s'emmotlla perfectament a les nostres necessitats, però és un sistema fràgil i poc divers.

Aquest treball vol canviar la perspectiva, entendre els processos biològics i contribuir a la recerca d'un model d'agricultura centrat en la sostenibilitat, sense deixar de banda les necessitats de la població. Tot això posant la mirada en la història i entenent que potser s'ha fet algun pas en fals durant la modernització de l'agricultura.

### 1.1 Passat i present de l'agricultura

Les primeres formes d'agricultura a Europa occidental es donen al Neolític, perquè els humans s'adonen que els vegetals no només es poden recollir d'on creixen espontàniament, sinó que es poden cultivar. Per regular el creixement de les plantes, comencen a modificar el medi, regular l'aigua de regadiu i preparar el sòl. Aquesta innovació permet canviar el nomadisme pel sedentarisme. El primer problema que es troben és el de la disminució de la fertilitat dels sòls on cultiven.

Durant la història s'introdueixen diversos mètodes per aconseguir una major fertilitat de la terra. Aquests mètodes són la crema de matolls, la rotació de cultius o la llaurada, que es van perfeccionant al llarg dels anys amb la introducció de noves eines i la tracció animal. Durant el segle XV s'integra la ramaderia i l'agricultura amb la rotació regular, a partir de la qual es produeix farratge per alimentar el bestiar. Cap al segle XVIII la modernització del camp cada cop es fa més palpable amb l'aparició de màquines que fan la feina de manera més eficient i substàncies químiques.

Posant el centre al territori espanyol, l'agricultura fa un canvi excepcional durant el franquisme. S'apliquen polítiques que promouen una modernització agrícola sense precedents, amb intensa mecanització, agroquímics, noves varietats i noves formes de regadiu. Tots aquests canvis s'engloben dins la "revolució verda", possible gràcies a les subvencions del govern franquista. Aquest nou sistema pretén que hi hagi "menys agricultors i millor agricultura", ja que és un canvi regulat pel govern, i els petits pagesos que no poden seguir el ritme imposat es queden fora.

En termes de producció, la "revolució verda" obté molt bons resultats. Això permet que l'agricultura sigui cada vegada més globalitzada i s'exportin molts més productes. En poc temps, s'entra en una dinàmica on l'especulació financera és la protagonista, fet que provoca certa inestabilitat en l'agricultura. A més, aquest nou sistema té efectes negatius al medi natural, ja que suposa una pèrdua de diversitat agrícola i natural i una pèrdua de la qualitat dels sòls i les aigües (Reguant, 2018).



En l'actualitat se segueixen i es potencien moltes de les dinàmiques iniciades durant la "revolució verda". Tot i això, hi ha certa tendència a la promoció de models agraris alternatius. Aquests models són més sostenibles, més resilients, menys contaminants i més vinculats als coneixements locals. Es vol apostar per una agricultura de qualitat, adaptada a cada zona i que generi sinergies entre la gent (Espluga, 2018). L'agroecologia és la ciència que aporta les bases científiques perquè funcionin els sistemes diversos i capaços de sostenir-se a ells mateixos (Altieri, 2002).

Dins el marc de l'agroecologia, la Unió Europea ha desenvolupat diverses iniciatives que volen aconseguir un sistema de producció d'aliments just, saludable i sostenible, com l'estratègia "Farm to Fork". També aposta per generar "Nature-based solutions", és a dir, innovar amb un ull posat a la natura per aconseguir una societat més resilient i sostenible.

Lligat amb la idea d'agricultura sostenible, existeix l'agricultura de conservació, que és un model d'agricultura que promou que es facin les mínimes intervencions al sòl (FAO), i té com a objectiu promoure els processos naturals tant per sobre com per sota la superfície del sòl. Aquest sistema es basa en no llaurar, cobrir el sòl de matèria orgànica i fer rotació de cultius. S'ha vist que té efectes immediats, com per exemple l'augment de la infiltració d'aigua, i la disminució de l'evaporació i l'erosió. A llarg termini també presenta beneficis com l'augment de la matèria orgànica, la millora de l'estructura del sòl i la disminució de problemes amb plantes adventícies (Derpsch, 1999; Hobbs et al., 2007). Un altre concepte és el de l'agricultura ecològica, que és un tipus d'agricultura que s'ha reinventat per crear sistemes agroecològics sostenibles. Es basa en potenciar les fortaleses naturals dels ecosistemes i reduir al màxim les intervencions d'elements externs (Magdoff, 2007). Aquest tipus d'agricultura està sostinguda per la Unió Europea a base de subvencions que la promouen.

## **1.2 La llaurada**

Segons la Gran Enciclopèdia Catalana, llaurar significa solcar la terra, és a dir, remoure-la. Aquest acte es concep com una forma de condicionar la terra per la sembra, ja que té molts beneficis per al pagès. Les raons per llaurar la terra són moltes, entre elles: aconseguir un sòl menys compactat, eliminar la competència de les herbes adventícies, alliberar nutrients retinguts al sòl, aconseguir que els fertilitzants estiguin més disponibles per les arrels, controlar malalties i insectes, entre moltes d'altres (Hobbs et al., 2007). Tots aquests beneficis per al pagès, comporten també un cost per ell mateix i sobretot pel medi ambient i els recursos naturals dels quals depèn el cultiu.

Els sistemes de llaurada convencional es basen en manipular físicament el sòl, de manera que s'aconsegueix airejar-lo, controlar les herbes adventícies, fer que la terra sigui fina i que assoleixi una humitat adequada (Baker et al., 2006). Segons la maquinària que s'utilitza, es remou la terra d'una manera o altra. Hi ha mètodes que voltegen la terra, com el tombat, i mètodes que simplement la remouen sense causar tant de rebombori, com l'estripat.

L'eliminació de la llaurada o la reducció d'aquesta és un mètode alternatiu a la llaurada convencional, que consisteix en no remoure la terra abans de plantar els cultius. Això va molt lligat amb el concepte de sembra directa, ja que les llavors es col·loquen directament al sòl generant el mínim moviment de terra possible. La teoria en aquest cas està clara, no tocar el sòl des de la recol·lecció del cultiu anterior fins al moment de sembrar el cultiu. Tot i això, a la pràctica hi ha algunes accions que se solen fer per millorar les collites, com per exemple posar fertilitzants a la superfície de la terra o treure les herbes adventícies abans de la sembra (Baker et al., 2006).

Cal tenir en compte que la sembra directa és un mètode que vol aconseguir una terra estructurada i equilibrada. Aquesta feina la fan els microorganismes que habiten el sòl, però no poden fer-ho amb poc temps, sinó que necessiten molts anys per aconseguir un bon resultat. Un sòl estructurat comporta millor infiltració, augment de la biodiversitat, més retenció d'aigua, entre molts altres beneficis. Aquest mètode està sobre la taula perquè està en qüestionament si és realment beneficiós llaurar la terra per aconseguir una bona collita. De fet, l'any 1943 Edward Faulkner escriu en el seu llibre "Plowman's Folly" que "ningú ha trobat mai una raó científica que justifiqui la llaurada", una afirmació que té molt de sentit en el context en el qual ens trobem actualment.

Els agricultors i la població en general s'ha de preguntar per què s'hauria de canviar el sistema de producció d'aliments si l'actual és enormement exitós. Quant a costos, el canvi de llaurada convencional a no llaurar disminueix els costos de combustibles fòssils, però pot resultar molt costós perquè s'ha d'actualitzar tota la maquinària. A més, no llaurar pot suposar riscos per a la collita, ja que hi ha més risc de malalties, plagues i toxines derivades del fet de no remoure la terra. Si es fa inadequadament, els fertilitzants poden generar estrès de nutrients als cultius. En general, la no llaurada és un mètode que depèn molt del lloc on es realitza i del bon ús que es fa de la maquinària. La Taula 1 mostra una comparació entre el no llaurat i la llaurada convencional.

**Taula 1.** Característiques contrastades de la llaurada convencional i el no llaurat.

<b>No llaurat</b>	<b>Llaurada convencional</b>
Reducció dels gasos d'efecte hivernacle.	Emet gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera, com per exemple CO <sub>2</sub> i N <sub>2</sub> O.
Creixen les adventícies, necessitat d'herbicides. Reducció de la germinació de noves adventícies.	Bon control de les herbes adventícies.
Reducció costos en combustibles fòssils, però cal comprar nova maquinària (costos afegits).	Costos alts, molta maquinària.

Augmenta la fertilitat: més matèria orgànica disponible i millora els cicles dels nutrients.	Augmenta la disponibilitat dels nutrients al sòl a curt termini. Disminució de la fertilitat del sòl a llarg termini.
Augment de la biodiversitat i preservació de la fauna del sòl.	Disminució de la biodiversitat i alteració de la fauna del sòl.
Retenció d'aigua més elevada i més infiltració	Poca retenció de l'aigua.
Preservació de l'estructura del sòl i disminució de l'erosió.	Destrucció regular de l'estructura del sòl i augment de l'erosió.
Possibilitat de malalties, plagues i toxines derivades de la no llaurada.	Més baixa possibilitat de malalties, plagues i toxines.

### 1.3 La qualitat del sòl

La llaurada és una activitat que destrueix l'estructura del sòl, i per tant n'afecta negativament la fauna i les propietats fisicoquímiques (Mamabolo et al., 2024), ja que canvia la quantitat d'aigua del sòl, la temperatura, l'aeració i el grau de barreja dels residus orgànics del camp (Kladivko, 2001). Llaurar la terra té una influència en els serveis ecosistèmics que aquest proporciona (Ayuke et al., 2019), que van des del cicle dels nutrients fins a la descomposició de matèria orgànica i la producció de plantes.

Segons Doran i Zeiss (2000), la qualitat o salut del sòl és la capacitat d'aquest de funcionar com a sistema vivent, per mantenir i millorar la productivitat vegetal i animal, la qualitat de l'aigua i l'aire i promoure la salut dels animals i les plantes. S'ha vist que és molt important tenir en compte la salut dels sòls, ja que són la base de les comunitats vegetals i de l'agricultura. El model d'agricultura centrat en la producció és la principal causant de la pèrdua de qualitat de sòl actualment, és per això que per les generacions futures, cal generar sistemes de producció que la conservin i millorin (Dorian i Zeiss, 2000).

La qualitat del sòl és un concepte que depèn del lloc i del temps. Per aquesta raó, és impossible crear un índex de salut del sòl que sigui vàlid per tots els tipus de sòls i, per tant, es mesura a partir de la productivitat, qualitat ambiental i característiques del sòl (Lichtenberg, 2024). Per l'estudi de la qualitat del sòl s'avaluen diversos aspectes mesurables, tant paràmetres físics com químics.

Un test preliminar és la determinació de la textura del sòl, que és determinada pel tipus de partícules que el conformen: argiles, llims i sorres. Segons el tipus de textura del sòl, tindrà diferent distribució de la matèria orgànica, incidència de la llum, infiltració de l'aigua, etc. (Khosravi et al., 2024). Per conèixer la globalitat de l'estat del sòl es pot estudiar l'estructura del

sòl, que condiciona la penetració de les arrels, la disponibilitat d'aigua per les plantes i l'aeració, a partir del test de pala (Ball et al. 2007).

En l'agricultura un factor molt important és la capacitat del sòl per retenir l'aigua de la pluja. La retenció de l'aigua s'aconsegueix a partir d'una bona infiltració i poca evaporació, combinades amb baixos nivells d'escorrentia i erosió. La mesura d'infiltració indica quina és la capacitat del sòl estudiat per captar l'aigua de la pluja. S'ha estudiat que els nivells d'infiltració són més alts en sòls tractats amb agricultura de conservació que amb sòls que es llauren repetidament (Thierfelder i Wall, 2009).

Quant a paràmetres químics, cal parar atenció a la matèria orgànica del sòl. Els sòls contenen una gran quantitat de carboni orgànic, tot i això, aquest es pot degradar fàcilment a causa de pràctiques agrícoles que no són respectuoses amb el sòl, com per exemple la llaurada intensiva i repetida.

Un dels nutrients més important pel creixement de les plantes és el nitrogen (N), que es pot trobar de diferents formes al sòl: orgànic, inorgànic, dissolt, nitrat ( $\text{NO}_3^-$ -N), nitrit ( $\text{NO}_2^-$ -N) i amoni ( $\text{NH}_4^+$ -N). Normalment, es passa d'una forma a una altra per acció dels microorganismes del sòl, a partir de diferents processos: fixació de nitrogen, síntesi i degradació de nitrogen orgànic, nitrificació, desnitrificació, oxidació anaeròbia de l'amoni i reducció del nitrat (Fang et al., 2024). El cicle del nitrogen consisteix en un procés pel qual el nitrogen es mou de l'atmosfera als sòls, canviant de formes orgàniques a inorgàniques i viceversa (Liu et al., 2024).

En agricultura convencional, el nitrogen sovint s'incorpora en excés al sòl a partir de fertilitzants, majoritàriament en forma de nitrat ( $\text{NO}_3^-$ -N) (Husk et al., 2017). Aquest nitrogen pot suposar un problema perquè va a parar a sistemes aquàtics propers als camps, i els contamina.

Les plantes poden absorbir nitrogen en forma d' $\text{NH}_4^+$  i  $\text{NO}_3^-$ . El N retingut a la matèria orgànica es troba majoritàriament en forma reduïda ( $\text{NH}_2$ ), és per això que hi ha molts microorganismes que poden passar-lo a  $\text{NH}_4^+$  perquè estigui disponible per les plantes. Les plantes lleguminoses són un tipus de planta capaç de fixar nitrogen de l'atmosfera a partir de l'activitat de bacteris simbiòtics als nòduls de les seves arrels. Aquesta activitat fixadora de nitrogen és molt beneficiosa pel sòl, ja que l'enriqueix (Han et al., 2024).

Altres nutrients importants al sòl són el fòsfor, el potassi, el calci o el magnesi, que juntament amb el nitrogen i el carboni, condicionen el creixement de les plantes. Tot i això, les plantes no podrien tenir nutrients disponibles si no fos gràcies a l'acció de la comunitat microbiana del sòl, que regula el cicle dels nutrients i la retenció de carboni (Hemkemeyer et al., 2021). La comunitat bacteriana del sòl està estretament lligada amb l'estructura d'aquest, ja que de l'estructura en depenen l'aeració, l'aigua disponible, entre molts altres factors. Algunes pràctiques agrícoles molt invasives usades en agricultura convencional alteren l'estructura del sòl, i per tant també els processos microbiològics que hi ha. El creixement del cultiu depèn en bona part de la disponibilitat de nutrients, i per tant de l'estructura del sòl i del bon estat de la comunitat microbiològica.

#### 1.4 L'adaptació dels cultius

Els cultius contribueixen a la fertilitat del sòl, sobretot els fixadors de nitrogen atmosfèric, que poden ser un gran aliat per l'agricultura sostenible. Les lleguminoses tenen aquesta capacitat, mentre que els cereals no la tenen. L'ús de nutrients retinguts al sòl per part del cultiu depèn del tipus de cultiu i de com aquest interacciona amb el sòl, ja que condiciona el patró d'arrelament, els exsudats, l'adaptació de la planta a l'estrès hídric...

L'estat dels cultius es pot analitzar a partir de la teledetecció, a partir de l'anàlisi del color i es poden calcular índexs que donen informació sobre diferents paràmetres dels cultius. Dos dels índexs utilitzats en aquest treball són els índexs GA (Green Area) i GGA (Green – Gray Area), que indiquen la densitat de vegetació de diferents formes. També s'utilitza l'índex CSI (Chlorophyll stress index), que indica l'estrès de les plantes. L'índex NGRDIveg (Normalized Green Red Difference Index) s'utilitza per calcular la verdor del cultiu, i l'índex TGIveg (Triangular Greenness Index) per estimar-ne el contingut de clorofil·la. De forma alternativa es poden fer anàlisis de les fulles dels cultius per conèixer el seu contingut en N, indicador de salut, i l'isòtop  $^{13}\text{C}$ , indicador d'estrès.

S'ha realitzat un estudi al Pallars Jussà, en el qual s'ha comparat la qualitat del sòl en tres règims de llaurada diferents (sembra directa, tombat i estripat) en cinc cultius. Aquest estudi ha estat realitzat per la Universitat de Barcelona, en col·laboració amb l'Espigall i Pallarsactiu.

#### 1.5 El Pallars Jussà

La comarca del Pallars Jussà es troba a la plana de Lleida i als Pirineus, al nord-oest de Catalunya. S'hi poden trobar des de paisatges mediterranis fins a alta muntanya. El relleu de la comarca és accidentat, vertebrat pel riu Noguera Pallaresa.

A principis del segle XX, aquesta comarca, juntament amb la comarca veïna, el Pallars Sobirà, eren unes terres totalment allunyades de les zones més poblades de Catalunya, i sobreviuen gràcies a la ramaderia i l'agricultura. Durant el segle XX l'aigua va esdevenir el centre de l'economia de la comarca: es van construir embassaments i centrals hidroelèctriques. Al llarg de les dècades l'energia va passar a ser el punt central de l'economia, juntament amb l'agricultura i la ramaderia. L'any 1955 es va declarar el Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici i la majoria d'ingressos del Pallars van passar a estar relacionats amb el turisme de muntanya. Pocs anys més tard s'obrien tres estacions d'esquí i llocs on practicar ràfting. Actualment, l'activitat econòmica principal és el turisme.

La major part de la comarca és forestal. Tot i això, els boscos no tenen gaire pes quant a l'economia comarcal. L'agricultura, en canvi, sí que és important. Representa un 5% del PIB de la comarca i compta amb 730 persones afiliades al sector primari, segons les dades del juny del 2020 de l'observatori de treball i mercat productiu (Pallarsactiu, 2021). La zona agrícola es concentra al voltant de les poblacions més grosses i a les planes properes als rius (Fontseca, 2024).

Entre el Pallars Sobirà i el Pallars Jussà es compten 17.527 hectàrees conreades. D'aquestes, un 15% estan destinades a cultius llenyosos i la resta està destinat a cultius herbacis. A més, el 15% de les àrees són de regadiu i la resta de secà. El cultiu principal de la zona del Pallars són els cereals en primer lloc, els farratges en segon lloc i en tercer lloc els conreus industrials, essent la producció de 61%, 36% i 3%, respectivament.

Per una banda, els cereals de gra que es cultiven són ordi (62%), blat tou (27%), civada (7%) i altres (1%). Per altra banda, els farratges cultivats són alfals (45%), cereals d'hivern per a farratge (13%), trepadella i praderes polifites (12%), veça amb civada (8%), margall (7%) i altres (1%). Aquestes dades corresponen a les estadístiques de l'any 2020 del Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació (Pallarsactiu, 2021).

En general, els cereals com l'ordi i el blat s'utilitzen per a l'elaboració de pinso per la ramaderia. Tot i això, en alguns casos com el d'alguns cultius de civada s'utilitza per consum humà. El farratge s'utilitza per alimentar al bestiar de les explotacions dels mateixos agricultors que el cultiven o d'altres ramaders a qui ho venen.

Entre els cultius llenyosos, que existeixen a la comarca però en major quantitat, s'hi poden trobar camps d'ametllers i oliveres. Recentment, està augmentant la superfície de vinya, que s'inclou dins la Denominació d'Origen Costers del Segre (Armengol, 2014). Al Pallars Jussà, només el 5% de la producció ecològica és de cereals i lleguminoses per a gra, s'hi dediquen 10 operadors. L'1% de la producció ecològica de la comarca es correspon a fruiters, farratges i vinya. La resta de producció ecològica és de ramaderia (Pallarsactiu, 2021).

Aquest estudi va enfocat a generar alternatives sostenibles i resistents al canvi climàtic per l'agricultura del Pallars. Segons la modelització climàtica de l'estudi "Adaptació al canvi climàtic del sector agrícola de l'Alt Pirineu i Aran: riscos i oportunitats", realitzat per l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic (2017), el clima mediterrani penetrarà a les valls frescals actuals. Per tant, en aquestes zones els hiverns seran menys freds, hi haurà menys gelades, i els estius esdevindran secs, calorosos i llargs.

Així doncs, el canvi sobre el territori és imminent. Tota la zona de secà del Pallars Jussà s'haurà d'adaptar a les noves condicions, ja que serà probable que es vegin molt afectats alguns cultius tradicionals de la zona. Segons el model mencionat anteriorment, si no es fa un canvi en el tipus de cultius, hi poden haver moltes pèrdues econòmiques a la comarca i a la resta de l'Alt Pirineu i Aran.

A partir d'aquest estudi encarregat per l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic i realitzat per l'Espigall (2017), i moltes altres iniciatives, es va començar a fer front a les inquietuds generades pels canvis generats per el canvi climàtic. L'adaptació al clima que canvia ràpidament passa per diversificar els cultius al Pallars Jussà per obtenir conreus que s'adaptin a les noves condicions climàtiques. Tot i això, el Pallars Jussà pot tenir complicacions relacionades amb el dèficit hídric i la baixada de la producció (Pirineus Digital, 2022). És per aquest motiu que a part de trobar cultius rendibles econòmicament i resilents al canvi climàtic, cal també millorar els sòls agrícoles i crear estructures de comercialització local.

És important generar alternatives en relació amb la gestió dels sòls agrícoles, ja que el bon estat dels sòls és la base del cultiu. Aconseguir un sòl resilient al canvi climàtic i ben estructurat pot suposar un pas més cap a la sostenibilitat de l'agricultura de la zona del Pallars.

## **2 OBJECTIVES AND HYPOTHESIS**

The region of Pallars Jussà, like the rest of Catalonia, will be strongly affected by climate change. It is necessary to look for alternatives that allow the development of a resilient agriculture adapted to each territory. This work aims to study how different tillage regimes affect the properties of the soil and crop growth in a field in Salàs de Pallars. A field study has been conducted in which three tillage intensities and five cereal or forage crops are evaluated. Information has been collected regarding soil parameters after applying the different tillage treatments and before sowing. Crop leaves have also been analyzed.

The objectives of this study are:

- Comparing soil conditions in the first stages of no-tillage implementation. Also comparing them with two other tillage intensities: one very intense and the other intermediate.
- Observe the adaptation of five crops (2 cereals, 2 legumes and a polyculture), some of which are not well established in the edaphoclimatic situation of the Pallars Jussà region to different tillage regimes under ecological production.

The hypothesis of the study are the following:

- No tillage is the tillage treatment that will achieve a better balance between soil quality and crop productivity in the medium term.
- In the short term the benefits in soil quality and in the growth and nutrition of no-till crops may not be measurable.

## **3 MATERIALS I MÈTODES**

### **3.1 Lloc**

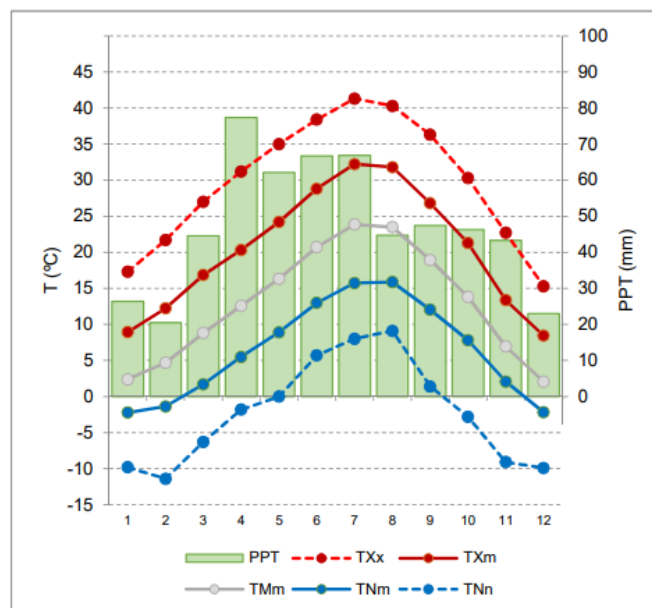
L'estudi es duu a terme a la comarca del Pallars Jussà, a la província de Lleida. Aquesta comarca limita amb l'Aragó per l'oest, el Pallars Sobirà i l'Alta Ribagorça al nord i l'Alt Urgell i la Noguera al sud. La comarca està delimitada per quatre zones geogràfiques: la conca Deçà, la conca Dellà, la Conca de Dalt i la Vall Fosca (Hipermapa, s.d.). Concretament, l'estudi es realitza al municipi de Salàs de Pallars, el més petit de la comarca (superfície de 20,53 km<sup>2</sup>). El camp on es realitza l'estudi (Figura 1) és normalment utilitzat per conreu de secà ecològic. Es troba a la dreta de la carretera C-13 en direcció Sort, en un trencant just abans d'arribar al km 96 i a l'esquerra del Pantà de Sant Antoni. Les coordenades del camp són 42.214983, 0.956493.



**Figura 1.** Visió aèria del camp d'estudi, marcat en color groc. Font: Vissir de l'ICGC i edició pròpia.

### 3.2 Clima i sòls

Les dades per la descripció del clima són de l'estació meteorològica automàtica del XEMA (Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques) de la Pobla de Segur. El clima de la comarca del Pallars Jussà varia a cada zona. Al nord de la comarca, que comprèn les parts més elevades, el clima és mediterrani prepirinenc occidental. A la resta de la comarca, de cotes més baixes, i per tant a Salàs de Pallars, el clima és mediterrani prepirinenc occidental. La distribució de la precipitació és escassa, varia segons la zona, però en general no hi plou gaire, les precipitacions anuals oscil·len entre el 600 i 800 mm/any. Els hiverns són freds amb gelades freqüents i els estius calorosos (Servei Meteorològic de Catalunya). El diagrama ombrotèrmic (Figura 2) mostra que els mesos més freds són els d'hivern, que a més presenten baixa pluviometria. Els mesos amb més pluja són els de primavera, i les temperatures més altes es registren a l'estiu.



**Figura 2.** Diagrama climàtic de la Pobla de Segur, anys 2007-2016. Font: Servei Meteorològic de Catalunya.



L'espai on es troba el camp d'estudi està molt a prop del Pantà de Sant Antoni. Es caracteritza per tenir sediments de procedència al·luvials, bastant fèrtils i aptes per a l'agricultura.

### 3.3 Disseny experimental

A l'estudi hi ha dos factors variables, és a dir, dues variables independents. Aquests són el tipus de llaurada i el tipus de cultiu. Quant al tipus de llaurada, s'han aplicat tres tractaments diferents: tombat amb sembra normal (T, Figura 4), estripat amb sembra normal (E, Figura 5) i grada ràpida amb sembra directa (SD, Figura 3). El tombat és un tipus de llaurada tradicional amb volteig del sòl, i per tant un gran impacte en l'estructura d'aquest. L'estripat és una modalitat de llaurada en el que es fa un treball superficial vertical. La sembra directa, a diferència dels altres dos, no requereix un treball previ de la terra, sinó que consisteix en la sembra del nou cultiu sobre el camp.



**Figura 3.** Sembrada directa



**Figura 4.** Tombat



**Figura 5.** Estripat

S'han estudiat cinc tipus de cultiu: lletia pardina (*Lens culinaris*), favó (*Vicia faba*), espelta (*Triticum spelta*), veça (*Vicia sativa*) amb civada (*Avena sativa*) i ordi de la varietat antiga pàmula (*Hordeum distichon* L.).

S'ha utilitzat un camp de 48 metres d'amplada i 138 m de llargada. Aquest s'ha dividit en tres blocs, que representen tres rèpliques. Cada un dels blocs conté tres bandes horitzontals amb els tres règims de llaurada. Cada una de les bandes conté 6 parcel·les de 12 x 6 m, una per cada cultiu, menys per veça amb civada, que n'ocupa dos sempre de costat. Cal comentar que a cada rèplica tant els cultius com el tipus de llaurada estan ordenats diferent i de manera aleatòria. La Figura 6 mostra un esquema del camp.

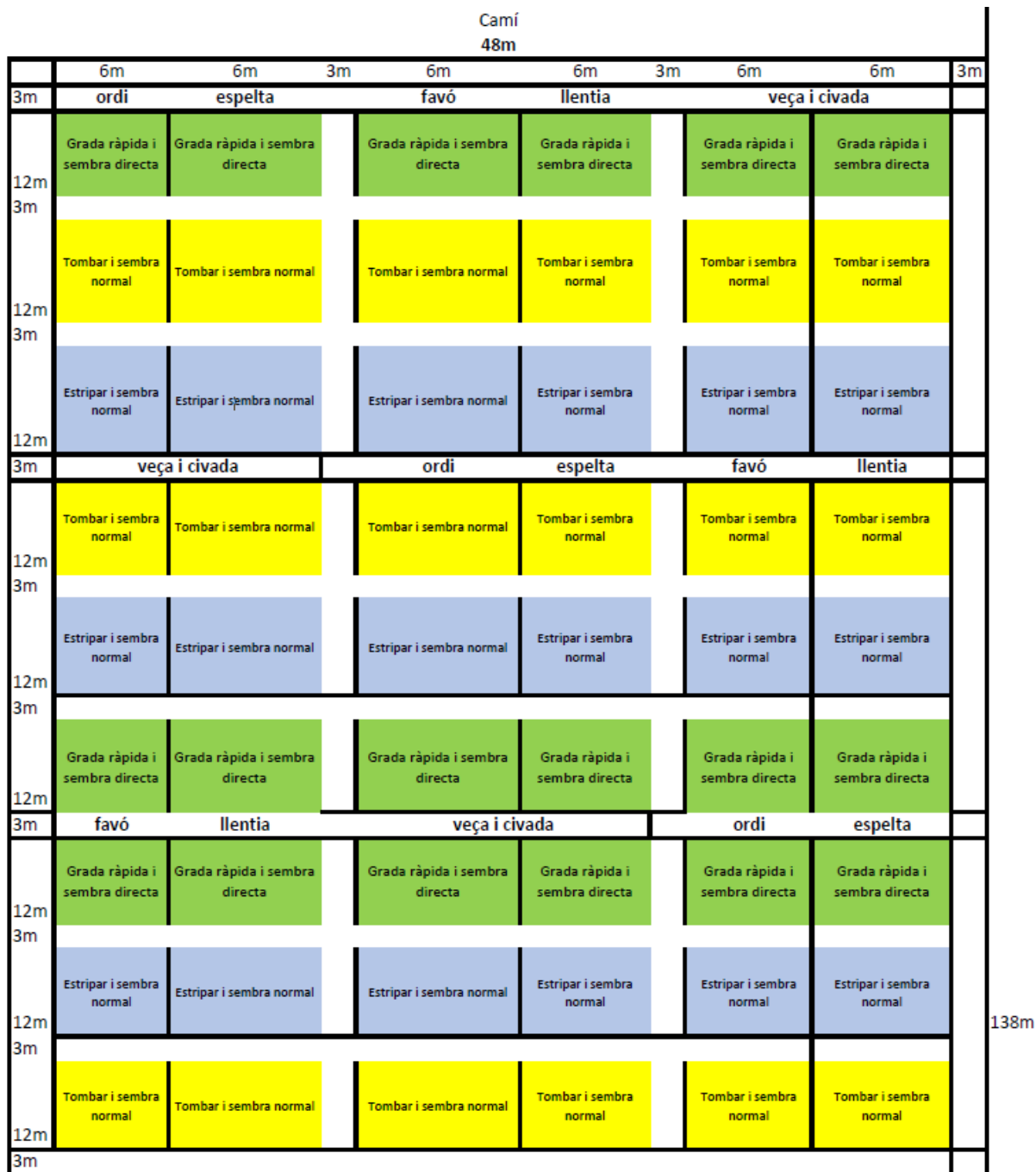


Figura 6. Esquema del camp d'estudi.

### 3.4 Anàlisi dels sòls

#### Recollida i tractament del sòl

Es va recollir una mostra de terra per cada un dels tractaments de llaurada, cultiu i rèplica, en data 26 d'octubre de 2023. Això es va fer amb una sonda de 5 x 5,5 cm, i prenent els 20 cm superficials, després de llaurar i abans de plantar els cultius. Es van conservar les mostres en bosses de plàstic tancades a temperatura ambient fins al moment de les anàlisis.

Per tal de poder dur a terme les anàlisis dels components del sòl, aquestes mostres de terra es van tamisar amb un garbell de 2,00 mm i es va separar la terra fina (diàmetre < 2 mm), les graves i pedres (diàmetre > 2 mm) i les restes orgàniques en bosses de plàstic, que es van conservar tancades i a temperatura ambient. Finalment, es van pesar i guardar a temperatura ambient les diferents porcions de les mostres.

### Densitat aparent

La densitat aparent de les mostres de terra és la relació que hi ha entre la massa de la fase sòlida del sòl sec i el volum total del sòl. Es va calcular en g/cm<sup>3</sup> segons l'equació 1, on TF es refereix a terra fina, GiP es refereix a graves i pedres i RO es refereix a restes orgàniques.

$$Dap = \left[ \frac{\text{pes TF}}{(\text{volum terra}) - \left(\frac{\text{pes GiP}}{2,65}\right) - \left(\frac{\text{pes RO}}{0,6}\right)} \right] \quad (\text{eq. 1})$$

### Textura

La textura indica quins tipus de partícules conformen la terra i en quines proporcions es troben, per poder determinar el tipus de terra. Es va fer un sol anàlisi d'una mostra de terra aleatòria de la zona d'estudi seguint el mètode de Sheldrick i Wang (1993). En aquest cas es va utilitzar el mètode de l'hidròmetre, que consisteix en suspendre 40 grams de sòl amb solució Calgon i aigua destil·lada, posar-hi l'hidròmetre i fer la lectura un cop han passat 40 segons per saber el % de llims + argiles, i després de 7 hores per saber el % d'argiles. A partir de les equacions 2 i 3 es pot saber el % de tots els components del sòl. Finalment, el sòl es va classificar amb un diagrama triangular de textura (Figura 7).

$$\% \text{ sorres} = 100 - \% \text{ argiles} + \text{llims} \quad (\text{eq. 2})$$

$$\% \text{ llims} = \% \text{ argiles} + \text{llims} - \% \text{ argiles} \quad (\text{eq. 3})$$

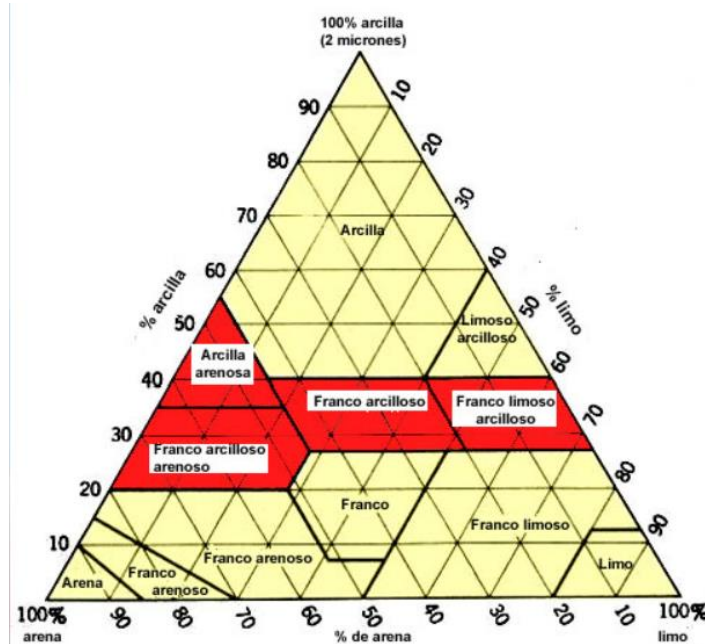


Figura 7. Diagrama textural. Font: FAO

## **NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N**

La mesura de l'amoni abans (NH<sub>4</sub> a.i.) i després (NH<sub>4</sub> d.i.) de la incubació dona informació sobre l'activitat bacteriana, que converteix el NO<sub>2</sub><sup>-</sup> de la matèria orgànica a NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Es va analitzar l'amoni al sòl realitzant una extracció amb KCl extret el llibre *Methods of Soil Analysis* (Weaver, R.W, 1994). Es van barrejar 5 grams de terra tamisada amb 12,5 mL d'aigua destil·lada i es va deixar incubant a l'estufa durant 7 dies a 40 graus centígrads. Llavors es va afegir 12,5 mL de solució KCl 4M. Aquesta barreja es va filtrar amb un filtre Whatman nº 42. Amb el mateix procés sense incubar les mostres es va determinar l'amoni sense incubació.

A partir de les extraccions filtrades, tant per les incubades com per les sense incubar, es va seguir el protocol per mesurar amoni en extraccions de KCl de Sims et. al. (1995). Aquest procés consisteix en afegir els reactius necessaris a les extraccions filtrades i llavors es determina la concentració de nitrogen amb una corba de calibració. Es llegeix l'absorbància (espectrofotòmetre Minidisk) a 650 nm del filtratge juntament amb diversos reactius especificats al mètode.

## **NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N**

Per la determinació de la concentració de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> al sòl, es van utilitzar els mateixos extractes de KCl que per l'amoni i es va seguir el protocol per mesurar nitrat en extractes de KCl de *Communications in Soil Science and Plant Analysis* (K. Sims et. al., 1995). En aquest cas es van fer modificacions en els patrons del protocol, que van ser de 0, 1, 4, 8 i 15 ppm. Finalment es va realitzar una corba de calibració. Les lectures es van realitzar directament a l'extracte filtrat amb un espectrofotòmetre, a 220 i 275 nm. Els càlculs van realitzar a partir del càlcul de l'absorbància final (eq. 4).

$$ABS\ NO_3^- = ABS220 - (2 \times ABS275) \quad (eq. 4)$$

A partir de les dades de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (abans i després de la incubació) i N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> es va calcular el nitrogen mineral (mg/kg), el nitrogen potencialment mineralitzable (NPM) (mg/kg) i el nitrogen disponible (mg/kg) als sòls analitzats a partir de les equacions 5, 6 i 7.

$$N\ mineral = NH_4^+ a.i. + NO_3^- \quad (eq. 4)$$

$$NPM = NH_4^+ d.i. - NH_4^+ a.i. \quad (eq. 5)$$

$$N\ disponible = NO_3^- + NH_4^+ d.i. \quad (eq. 6)$$

## **Carboni orgànic**

El càlcul del carboni orgànic serveix per tenir una mesura de la matèria orgànica present als sòls. Es va utilitzar el mètode de determinació de carboni orgànic en mostres sòls agrícoles amb colorimetria amb dicromat. Es van pesar entre 50 i 80 mg de terra triturada, i es van barrejar amb 2 mL de dicromat de potassi i 3 mL d'àcid sulfúric. Seguidament, es va col·locar a un digestor a 155 °C durant 30 minuts, es va afegir 5 mL d'aigua destil·lada i es van centrifugar els tubs a 2000 rpm durant 6 minuts. Els patrons es van preparar amb 0, 1, 5 i 8 mg de glucosa i es van tractar igual que les mostres. Es va llegir l'absorbància del sobrenedant de les mostres i dels

patrons a 600 nm amb un espectrofotòmetre. El càlcul es realitza per extrapolació de l'absorbància a la recta patró.



















### Contingut de N total, C total i C/N

Es va fer una anàlisi del contingut de C i de N total als sòls, als Centres Científics i Tecnològics de la Universitat de Barcelona (CCiTUB). Aquestes mesures van servir per calcular el contingut de C/N, que és una mesura indicadora de la capacitat d'evolució de la matèria orgànica.

### Test de pala

Es va fer el test de pala a partir del mètode de l'Avaluació Visual de l'Estructura del Sòl, elaborada pel SRUC (Scotland's Rural College), en col·laboració amb la Universitat de Maringá (Brasil) i la Universitat d'Arthus (Dinamarca) (Ball et al., 2007). El test de pala es va realitzar el dia 9 d'abril de 2024 a totes les parcel·les de favó i espelta, per tots els tractaments de llaurada.

Aquest mètode consisteix en fer una avaluació visual de l'estructura del sòl a partir de l'extracció d'un bloc de la part superficial del sòl d'uns 20 cm de profunditat. S'analitza cada capa del sòl i se li atribueix una qualificació de l'1 al 5 segons les seves característiques. Aquesta puntuació es pot observar a la Figura 8. Es van realitzar fotos de cada bloc extret amb una càmera Panasonic Lumix DMC-GX7 en format JPG.

Structure quality	Size and appearance of aggregates	Visible porosity and Roots	Appearance after break-up: various soils	Appearance after break-up: same soil different tillage	Distinguishing feature	Appearance and description of natural or reduced fragment of ~ 1.5 cm diameter
<b>Sq1 Friable</b> Aggregates readily crumble with fingers	Mostly < 6 mm after crumbling	Highly porous Roots throughout the soil			 Fine aggregates	 The action of breaking the block is enough to reveal them. Large aggregates are composed of smaller ones, held by roots.
<b>Sq2 Intact</b> Aggregates easy to break with one hand	A mixture of porous, rounded aggregates from 2mm - 7 cm. No clods present.	Most aggregates are porous Roots throughout the soil			 High aggregate porosity	 Aggregates when obtained are rounded, very fragile, crumble very easily and are highly porous.
<b>Sq3 Firm</b> Most aggregates break with one hand	A mixture of porous aggregates from 2mm -10 cm, less than 30% are <1 cm. Some angular, non-porous aggregates (clods) may be present	Macropores and cracks present. Porosity and roots both within aggregates.			 Low aggregate porosity	 Aggregate fragments are fairly easy to obtain. They have few visible pores and are rounded. Roots usually grow through the aggregates.
<b>Sq4 Compact</b> Requires considerable effort to break aggregates with one hand	Mostly large > 10 cm and sub-angular non-porous; horizontal/platy also possible; less than 30% are <7 cm	Few macropores and cracks All roots are clustered in macropores and around aggregates			 Distinct macropores	 Aggregate fragments are easy to obtain when soil is wet, in cube shapes which are very sharp-edged and show cracks internally.
<b>Sq5 Very compact</b> Difficult to break up	Mostly large > 10 cm, very few < 7 cm, angular and non-porous	Very low porosity. Macropores may be present. May contain anaerobic zones. Few roots, if any, and restricted to cracks			 Grey-blue colour	 Aggregate fragments are easy to obtain when soil is wet, although considerable force may be needed. No pores or cracks are visible usually.

**Figura 8.** Descripció de la qualitat del sòl a partir d'observacions visuals dels agregats de pocs cm de mida. Font: Ball et al., 2007

## Capacitat d'infiltració

Per cada una de les parcel·les es va realitzar una mesura de la infiltració els dies 8 i 9 d'abril de 2024, que dona informació sobre la capacitat que té el sòl d'absorbir aigua de pluja. Per fer-ho, es va utilitzar un infiltròmetre Mini Disk, de l'empresa METER Group, i es van seguir les instruccions del manual d'instruccions del dispositiu. Les mesures es van realitzar amb una velocitat d'aspiració de 2 cm. L'interval de temps amb el qual es van prendre les mesures va ser de 30 segons, i es van realitzar 11 mesures durant 5 minuts i 30 segons. A partir d'aquestes dades d'infiltració es va calcular la constant d'infiltració, K (mm/h), amb un full de càlcul d'Excel proporcionat per METER Group.

## 3.5 Anàlisi foliar

### Recollida i tractament de mostres

El dia 8 i 9 d'abril de 2024, aproximadament 6 mesos després de la sembra dels cultius sobre la parcel·la experimental, es van prendre mostres de la part aèria dels conreus. Es va prendre una mostra de fulla de cada parcel·la d'ordi, espelta, civada i favó. Per les parcel·les de veça i civada es van prendre dues mostres: una de veça i una de civada. En el cas de les parcel·les de lleguminoses (llentia i favó), es va prendre una mostra de lleguminosa i dues o tres mostres d'adventícies. Les espècies de plantes adventícies que es van recollir al camp van ser *Silene vulgaris* (colitx), *Convolvulus arvensis* (corretjola), *Taraxacum officinale* (dent de lleó), *Fumaria sp.* (fumaria), *Lolium perenne* (margall), *Capsella bursa-pastoris* (sarronet de pastor), *Fallopia convolvulus* (corretjola de llei) i gramínies variades diferents del margall (ordi, civada o espelta).

Les mostres de fulla es van guardar en bosses de paper a temperatura ambient durant el seu transport (dos dies), i llavors es van posar a l'estufa a 60 °C durant una setmana, aproximadament. Un cop seques, es van triturar amb una trituradora.

### Mesura del N total i isòtops (<sup>13</sup>C i <sup>15</sup>N)

Es va analitzar el contingut total de l'isòtop <sup>15</sup>N per poder tenir informació del nitrogen derivat de l'atmosfera. També es va mesurar el contingut de N total, que indica la nutrició de la planta. A més es va analitzar el <sup>13</sup>C per poder interpretar l'estrès hídric al llarg del creixement del conreu, ja que continguts alts d'aquest isòtop <sup>13</sup>C indiquen estrès hídric de la planta. Aquestes anàlisis es van realitzar als Centres Científics i Tecnològics de la Universitat de Barcelona (CCiTUB) durant la setmana del 29 d'abril de 2024.

### Fixació de nitrogen atmosfèric

Es va calcular el percentatge de nitrogen derivat de l'atmosfera, altrament dit, la fixació biològica de nitrogen, de les plantes lleguminoses, per cada una de les parcel·les de favó, llentia o veça a partir de l'equació 8.

$$\%N_{dda} = \frac{15N \text{ de referència} - 15N \text{ de la fixadora}}{15N \text{ de referència} - b} \times \frac{100}{1} \quad (\text{eq. 8})$$

El  $^{15}\text{N}$  de la fixadora és el nivell d'aquest isòtop a la fulla de la lleguminosa corresponent a cada parcel·la. El  $^{15}\text{N}$  de referència del favó i la lletia s'ha calculat a partir de la mitjana del  $^{15}\text{N}$  present a les fulles de les adventícies de cada parcel·la. S'han exclòs els valors de  $^{15}\text{N}$  de la corretjola i de la dent de lleó, ja que els baixos nivells de  $^{15}\text{N}$  presents a la planta indiquen una potencial activitat fixadora de nitrogen. Per les parcel·les de veça, s'ha utilitzat la civada com a planta de referència. El paràmetre b és una constant diferent per cada una de les plantes lleguminoses segons la Taula 2.

**Taula 2.** Valors del paràmetre b segons l'espècie (Unkovich et al., 2008).

	Paràmetre b
Favó	-0,5
Lletia	-0,56
Veça	-0,84

### Anàlisi d'imatges

Es va mesurar el recobriment dels camps i l'índex de senescència foliars a partir d'imatges RGB (Red-Green-Blue) dels cultius, un mètode no invasiu i de baix cost (Gracia-Romero et al., 2017; Casadesús et al., 2007). Aquestes imatges es van obtenir amb una càmera Panasonic Lumix DMC-GX7, en format JPG. Es van prendre a 1 metre i perpendiculars a la superfície del terra. Per cada parcel·la es van realitzar 4 fotografies, i això es va fer dos cops de forma ordenada.

Les imatges es van analitzar amb el Breedpix (FIJI) per tal d'obtenir diferents índexs de vegetació basats en els colors dels píxels (Sancho-Adamson et al., 2019). L'àrea verda (GA, Green Area) es va obtenir de l'anàlisi dels píxels  $60^\circ < \text{Hue} < 180^\circ$ , i l'àrea verda-grisa (GGA, Greener Area) es va obtenir dels píxels  $80^\circ < \text{Hue} < 180^\circ$ . Els valors de GA i GGA s'utilitzen en aquest treball com a indicadors de recobriment. Es va calcular l'índex de senescència foliar amb la fórmula de Zaman-Allah et al. (2015) (eq. 9). L'índex de senescència foliar (CSI, Chlorophyll Senescence Index) s'utilitza per veure diferències en la capacitat fotosintètica dels cultius.

$$CSI = 100 \times \left( \frac{GA - GGA}{GA} \right) \quad (\text{eq. 9})$$

Per altra banda, es va calcular l'índex NGRDI (Normalized Green-Red Difference Index), a partir de les bandes verda i vermella, i és un altre índex de vegetació. Es calcula amb la fórmula de Hunt et al. (2005) (equació 10). DN es refereix a "digital number", que és un nombre que oscil·la entre -1 i 1 i defineix la diferència entre les reflectàncies de les bandes verda i vermella (Sancho-Adamson et al., 2019).

$$NGRDI = \frac{\text{Green DN} - \text{Red DN}}{\text{Green DN} + \text{Red DN}} \quad (\text{eq. 10})$$

Un índex de vegetació que es va calcular va estar el Triangular Greenness Index (TGI). Aquest índex es basa en l'àrea d'un triangle que envolta les característiques espectrals de la clorofil·la i està correlacionat amb el contingut de clorofil·la de les plantes i la seva biomassa. Aquest triangle té punts a 670, 550 i 480 nm (Hunt et al., 2013; Elishikha et al., 2022). L'equació 11 utilitza les reflectàncies (R670, R550 i R480) a les tres longituds d'ona.

$$TGI = -0,5 \times [(670 - 480) \times (R670 - R550) - (670 - 550) \times (R670 - R480)] \quad (\text{eq. 11})$$

Es van calcular dues adaptacions dels anteriors índexs de vegetació, NGRDiveg i TGliveg, que eliminen l'efecte del sòl a les imatges (Hamdone et al, 2023), i són els que s'han utilitzat per a les posteriors anàlisis.

### 3.6 Anàlisi estadística

L'anàlisi estadística es va realitzar íntegrament amb RStudio i Excel. Els resultats de l'anàlisi dels paràmetres dels sòls, presos després de la llaurada i abans de la sembra dels cultius, es van representar en boxplots i es van analitzar amb una ANOVA unifactorial, que avalua si hi ha diferències estadísticament significatives entre les diferents intensitats de llaurada (SD, E i T), amb nivell de significació del 0,05%. Es van dur a terme també tests de Tukey per identificar les diferències entre les intensitats de llaurada en els paràmetres del sòl amb una ANOVA unifactorial significativa.

L'anàlisi estadística dels índexs de vegetació de les fulles es va realitzar a partir d'un test ANOVA de dos factors: el tipus de llaurada i el cultiu. Pels tests significatius ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), es va realitzar un test de Tukey. Els resultats significatius es van representar amb gràfics de tipus diagrama de caixes, on es representen les caixes dels cultius agrupades pel tipus de llaurada. Es van fer les mateixes anàlisis i gràfics pels valors de  $^{15}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}$  i N total de les fulles, tot i que en aquest cas s'estudiaven els cultius com en les anàlisis anteriors, sinó que s'estudiaven les plantes per separat. Així doncs, es van analitzar 6 plantes: favó, espelta, lletia, veça, civada i ordi.

Per l'anàlisi de la intensitat de la fixació de nitrogen es va fer una comparació del nivell de  $^{15}\text{N}$  de les diferents espècies de plantes adventícies de les parcel·les de favó i lletia. Per fer-ho es va realitzar un gràfic de barres i un test ANOVA de dos factors (llaurat i espècie d'adventícia). Seguidament, es va realitzar una ANOVA de dos factors (nivell de significació 0,05) amb el paràmetre N<sub>dda</sub> (Nitrogen derivat de l'atmosfera), on s'observa si hi havia diferències estadísticament significatives en la fixació de N atmosfèric entre les espècies de lleguminosa i les intensitats de llaurada del sòl.

Finalment, es van realitzar tres matrius que mostren les correlacions estadísticament significatives ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) amb el programa RStudio. La primera de les matrius incorpora les dades de tots els cultius per totes les intensitats de llaurada. Les dades del sòl que es van comparar mitjançant la primera correlació van ser les restes orgàniques (%), densitat aparent ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  abans de la incubació,  $\text{NH}_4^+$  després de la incubació, N mineral, NPM, N disponible, N total,  $^{15}\text{N}$ , C total,  $^{13}\text{C}$ , C orgànic, ràtio C/N i K ( $\text{mm}/\text{h}$ ). Es van incorporar els següents índexs de vegetació dels cultius a la correlació: GA, GGA, CSI, NGRDiveg i TGliveg.



Es va fer també una matriu que mostra els resultats de correlacions dels paràmetres anteriors però només amb les dades dels cultius dels cereals espelta i ordi. En aquest cas es van afegir als paràmetres que es correlacionen el N total, el <sup>15</sup>N i el <sup>13</sup>C de la fulla. Es va realitzar una tercera matriu amb les dades dels cultius de les lleguminoses favó i lletia. En aquest cas es va afegir a la correlació el paràmetre de la intensitat de N derivat de l'atmosfera que conté la fulla.

## 4 RESULTATS

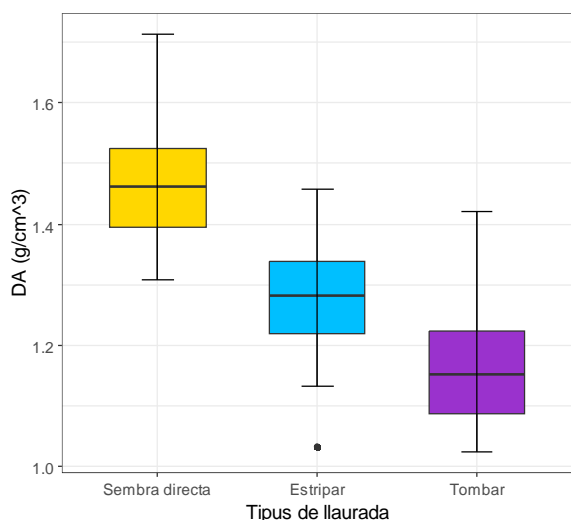
### 4.1 Resultats dels sòls

L'anàlisi de la textura va determinar que el sòl és de tipus argilós. Es va fer el test de pala a tots els tractaments i totes les rèpliques, però només als cultius de lletia i espelta. A partir d'aquesta observació visual als dos cultius, no es van notar diferències clares entre ells, ni tampoc entre les tres intensitats de llaurada. En el conjunt del camp es va observar que la majoria dels sòls tenien una capa fina d'uns 3 - 4 cm a la superfície on la terra era del tipus Qs1. La resta de la terra era més dura i sempre del tipus Qs2 o Qs3. En alguna extracció puntual es van observar capes més toves o més dures en fondària. A més, en tots els tractaments de llaurada i als dos cultius es va observar agrupament radicular com a mínim en una de les rèpliques.

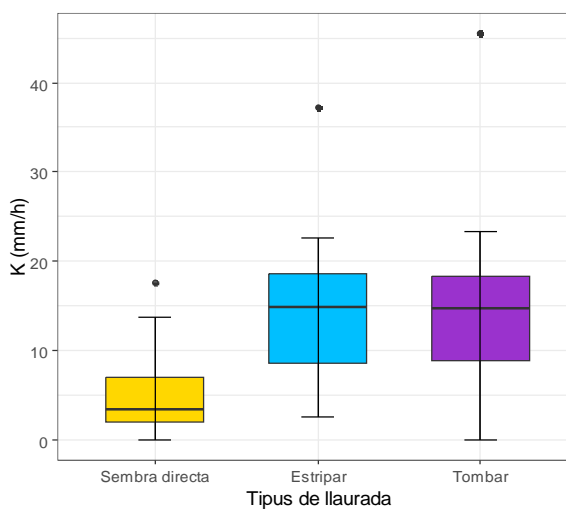
**Taula 3.** Mitjanes d'algunes propietats fisicoquímiques del sòl (K (mm/h): constant d'infiltració d'aigua al sòl) pels diferents tractaments de llaurada (SD: sembra directa; E: estripat; T: tombat). Es presenten les mitjanes ± la desviació estàndard. El p-valor correspon a una ANOVA pel factor llaurada. Les lletres en parèntesi mostren les diferències significatives entre les mitjanes dels diferents tractaments de llaurada.

	SD	E	T	p-valor
<b>Densitat aparent (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,46 ± 0,11 (a)	1,28 ± 0,11 (b)	1,17 ± 0,12 (c)	< 0,01
<b>C total (%)</b>	5,35 ± 0,63	5,46 ± 0,4	5,14 ± 0,35	0,19
<b>N total (%)</b>	0,16 ± 0,04	0,17 ± 0,05	0,17 ± 0,05	0,8
<b>Ràtio C/N</b>	15,57 ± 4,66	15,22 ± 4,69	15,45 ± 5,26	0,90
<b>C orgànic (%)</b>	2,43 ± 0,51	2,44 ± 0,23	2,46 ± 0,12	0,98
<b>K (mm/h)</b>	5,13 ± 5,15 (b)	15,44 ± 10,4 (a)	14,75 ± 8,58 (a)	< 0,01

No es van observar diferències estadísticament significatives (p-valor < 0,05) per raó de la intensitat de llaurada pels paràmetres de C total, N total, ràtio C/N i C orgànic (Taula 3). La densitat aparent sí que va presentar diferències estadísticament significatives (p-valor < 0,05). En aquest cas, el tipus de llaurada menys intens (sembra directa) és el que va presentar un valor més alt de densitat aparent, i el tombat, que és el tractament més intens, el que va presentar uns valors més baixos de densitat aparent (Figura 9). En el cas de la capacitat d'infiltració d'aigua (K), es va veure que els tractaments més invasius (tombat i estripat) tenien una K major, i la sembra directa tenia menys capacitat d'infiltració (Figura 10). Aquests resultats indiquen que la intensitat de llaurada va canviar les propietats físiques del sòl, però les propietats químiques no van resultar significativament alterades.



**Figura 9.** Densitat aparent (DA) en g/cm<sup>3</sup> segons la intensitat de llaurada.



**Figura 10.** Capacitat d'infiltració d'aigua al sòl (K) en mm/h segons la intensitat de llaurada.

Per compostos de N presents al sòl després de la llaurada, es van observar resultats estadísticament significatius en el cas del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> abans de la incubació, el N mineralitzable i el N potencialment mineralitzable. El sòl amb llaurada d'intensitat mitjana, l'estripar, és el que va presentar una concentració més alta de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> abans de sotmetre'l a una incubació, seguida pel tombat i finalment la sembra directa. En canvi, el valor d'amoni després de la incubació no va variar en funció del règim de llaurada. El N mineral va ser més abundant en els sòls estripats que en els tombats i sembra directa, en canvi, el NPM va ser més abundant en els sòls amb sembra directa. No es van observar diferències pel que fa al N disponible ni en la concentració de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dels sòls amb diferents intensitats de llaurada (Taula 4). Aquests resultats no indiquen que la llaurada fos un factor determinant en relació amb la presència de nutrients al sòl, sinó que indiquen heterogeneïtat dels nutrients presents al sòl.

**Taula 4.** Mitjanes dels compostos de nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a.i.: NH<sub>4</sub><sup>+</sup> abans de la incubació; NH<sub>4</sub><sup>+</sup> d.i.: NH<sub>4</sub><sup>+</sup> després de la incubació; NM: nitrogen mineral; NPM: nitrogen potencialment mineralitzable; Ndisp: nitrogen disponible) pels diferents tractaments de llaurada (SD, sembra directa; E, estripar; T, tombat). Es presenten les mitjanes ± la desviació estàndard. El p-valor correspon a una ANOVA pel factor llaurada. Les lletres en parèntesi mostren les diferències significatives entre les mitjanes dels diferents tractaments de llaurada.

	SD	E	T	p-valor
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	94,30 ± 31,39	106,28 ± 27,58	81,91 ± 20,08	0,055
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> a.i.	22,14 ± 3,28 (c)	60,78 ± 4,17 (a)	39,20 ± 23,07 (b)	< 0,01
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> d.i.	143,18 ± 29,40	124,22 ± 33,88	121,57 ± 27,07	0,115
NM	116,44 ± 32,18 (b)	167,07 ± 27,78 (a)	121,13 ± 22,08 (b)	< 0,01
NPM	121,04 ± 29,53 (a)	63,45 ± 34,5 (b)	82,37 ± 49,15 (b)	< 0,01
Ndisp	237,48 ± 42,84	230,51 ± 38,02	203,49 ± 43,10	0,07

## 4.2 Resultats de les fulles

**Taula 5.** Mitjanes dels índexs de vegetació (GA: Green Area; GGA: Green-Gray Area; CSI: Chlorophyll Senescence Index; NGRDIveg: Normalized Green Red Difference Index - Vegetation; TGIveg: Triangular Greenness Index – Vegetation) pels diferents tractaments de llaurada (SD, sembra directa; E, estripat; T, tombat) i els cultius (VC: veça amb civada). Es presenten les mitjanes  $\pm$  la desviació estàndard. Els p-valors corresponen a una ANOVA pels factors llaurada, cultiu i la interacció entre llaurada i cultiu (LL x C). Les lletres en parèntesi mostren les diferències significatives entre les mitjanes dels diferents tractaments de llaurada.

	LLAURADA				CULTIU						Interacció LL x C
	SD	E	T	p-valor	Favó	Espelta	Llentia	VC	Ordi	p-valor	p-valor
<b>GA</b>	0,82 $\pm$ 0,1	0,79 $\pm$ 0,12	0,82 $\pm$ 0,14	0,395	0,91 $\pm$ 0,08 (a)	0,75 $\pm$ 0,1 (b)	0,94 $\pm$ 0,05 (a)	0,78 $\pm$ 0,04 (b)	0,68 $\pm$ 0,06 (b)	<b>&lt; 0,01</b>	0,473
<b>GGA</b>	0,51 $\pm$ 0,17 (a)	0,49 $\pm$ 0,17 (ab)	0,60 $\pm$ 0,2 (b)	<b>0,019</b>	0,68 $\pm$ 0,15 (a)	0,46 $\pm$ 0,11 (b)	0,7 $\pm$ 0,13 (a)	0,52 $\pm$ 0,1 (b)	0,71 $\pm$ 0,13 (b)	<b>&lt; 0,01</b>	0,509
<b>CSI</b>	39,42 $\pm$ 12,93 (a)	39,98 $\pm$ 14,04 (a)	28,95 $\pm$ 15,07 (b)	<b>0,002</b>	26,82 $\pm$ 11,34 (c)	39,94 $\pm$ 8,72 (b)	25,37 $\pm$ 10,48 (c)	32,79 $\pm$ 11,04 (bc)	55,68 $\pm$ 7,51 (a)	<b>&lt; 0,01</b>	0,687
<b>NGRDI veg</b>	0,13 $\pm$ 0,02	0,13 $\pm$ 0,02	0,14 $\pm$ 0,03	0,109	0,13 $\pm$ 0,01 (b)	0,14 $\pm$ 0,01 (b)	0,17 $\pm$ 0,02 (a)	0,13 $\pm$ 0,01 (b)	0,13 $\pm$ 0,01 (b)	<b>&lt; 0,01</b>	0,582
<b>TGIveg</b>	5937 $\pm$ 609 (a)	5948 $\pm$ 663 (a)	5480 $\pm$ 741 (b)	<b>0,004</b>	4914 $\pm$ 670 (c)	6491 $\pm$ 234 (a)	5932 $\pm$ 343 (b)	4860 $\pm$ 359 (b)	5962 $\pm$ 414 ab	<b>&lt; 0,01</b>	0,448

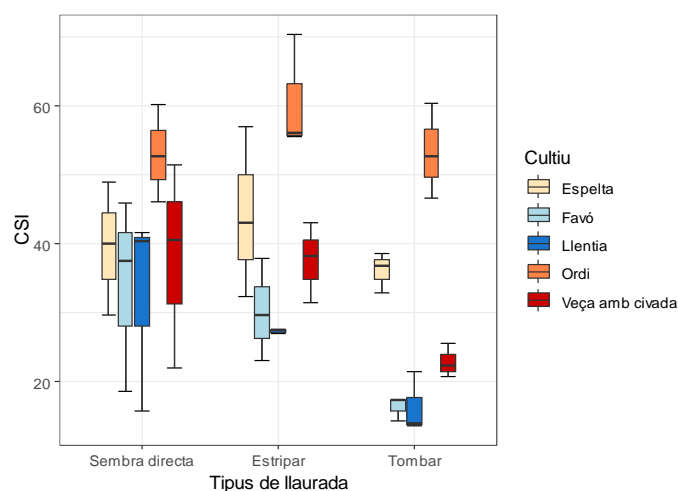
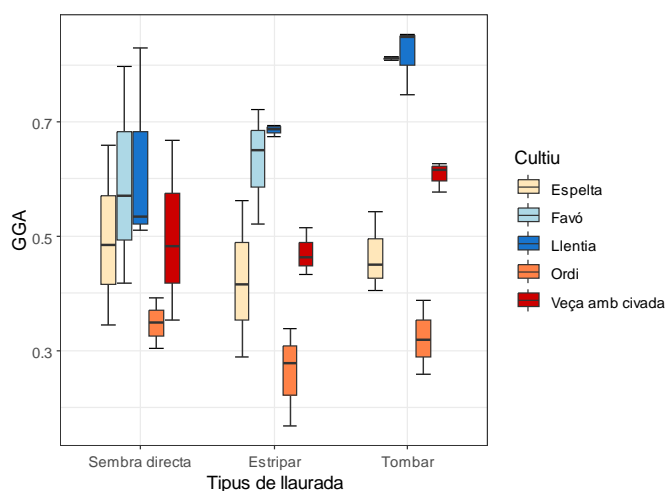
Els índexs de vegetació es poden fer servir com a indicadors d'estrès o recobriment. Es van analitzar per tots els tractaments de llaurada i els diferents cultius. A la Taula 5 s'observa que la intensitat de llaurada va tenir efecte sobre varis dels índexs de vegetació.

Els índexs GA i GGA indiquen recobriment del cultiu, és a dir, són una mesura de la producció. No hi va haver diferències respecte a l'índex GA per les intensitats de llaurada, però sí que n'hi va haver per l'índex GGA, per el que es va veure que les parcel·les amb sembra directa són les que presenten menys recobriment i les parcel·les amb tombat les que en presenten més (Figura 11).

L'índex CSI es refereix al nivell de senescència de la fulla. Es ve veure que les parcel·les amb sembra directa i estripat van tenir nivells de senescència de la fulla més alts que les de tombat (Figura 12). Quant als altres índexs, el NGRDIveg no va presentar diferències significatives en relació amb el llaurat, i el TGIveg sí que en va presentar, mostrant nivells més alts de clorofil·la a les parcel·les amb sembra directa i estripat.

En relació amb els cultius, tots els índexs presenten diferències significatives (Taula 5). Es va observar un major recobriment, és a dir, un índex GA i GGA major pels monocultius de lleguminoses (favó i llentia) que per espelta, veça amb civada i ordi. El cultiu que va presentar una senescència major va ser l'ordi, seguit de l'espelta i la veça amb civada. Els que van presentar menor senescència van ser els cultius de lleguminoses. L'índex NGRDIveg va ser igual per tots els cultius, menys per la llentia, que va ser major. Els valors de TGIveg indiquen la quantitat de

clorofil·la, per tant, l'espelta és el cultiu que en tenia més i el favó el cultiu que en tenia menys, mentre que la resta de cultius van presentar valors entremitjos. La interacció entre el cultiu i la intensitat de llaurada no representa un factor a tenir en compte, ja que els resultats no són estadísticament significatius.



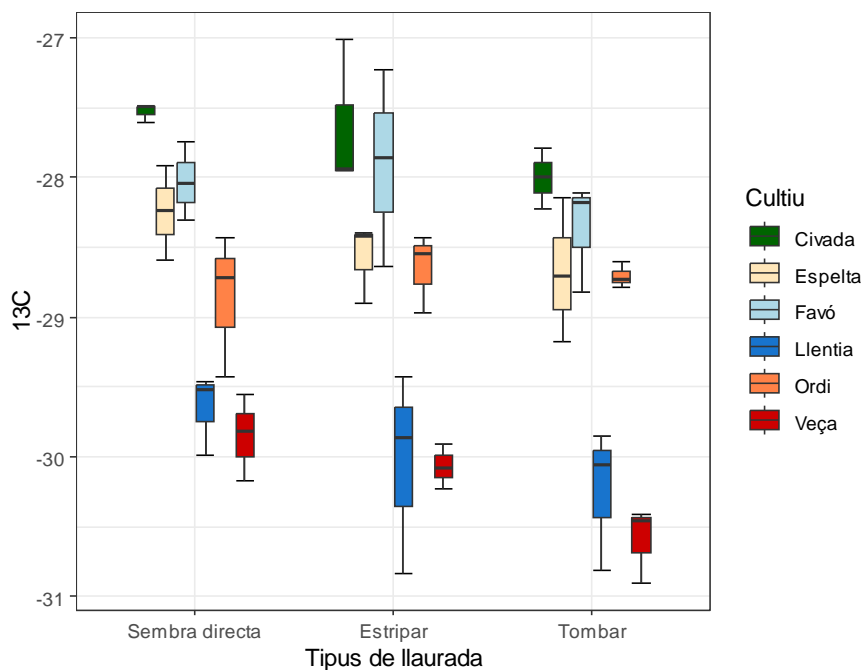
**Figura 11.** Índex GGA segons la intensitat de llaurada i el cultiu.

**Figura 12.** Índex CSI segons la intensitat de llaurada i el cultiu.

**Taula 6.** Mitjanes dels isòtops  $^{15}\text{N}$  i  $^{13}\text{C}$  i el contingut de N total de les fulles pels diferents tractaments de llaurada (SD, sembra directa; E, estripada; T, tombada) i els cultius (favó; espelta; llentia; VC: veça amb civada; ordi). Es presenten les mitjanes  $\pm$  la desviació estàndard. El N total ha estat convertit a partir del logaritme neperià. Els p-valors corresponen a una ANOVA pels factors llaurada, cultiu i la interacció entre llaurada i cultiu (LL x C). Les lletres en parèntesi mostren les diferències significatives entre les mitjanes dels diferents tractaments de llaurada.

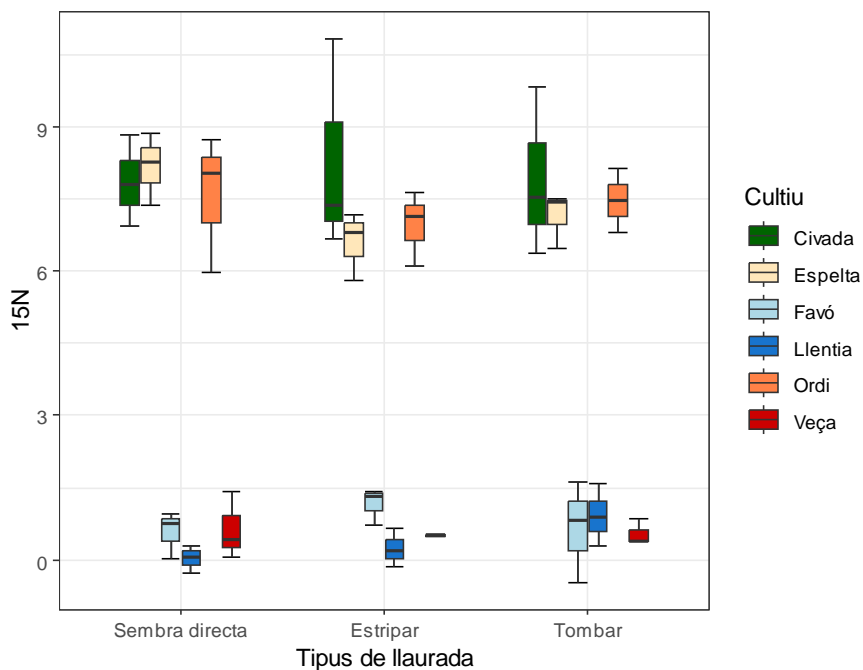
	LLAURAT				CULTIU							Interacció LL x C
	SD	E	T	p-valor	Favó	Espelta	Llentia	Veça	Civada	Ordi	p-valor	p-valor
$^{15}\text{N}$	4,13 $\pm$ 3,79	4,1 $\pm$ 3,59	3,95 $\pm$ 3,48	0,872	0,8 $\pm$ 0,67 (b)	7,29 $\pm$ 0,91 (a)	0,39 $\pm$ 0,57 (b)	0,57 $\pm$ 0,38 (b)	8,01 $\pm$ 1,51 (a)	7,33 $\pm$ 0,92 (a)	< 0,01	0,706
$^{13}\text{C}$	-28,7 $\pm$ 0,88 (a)	-28,81 $\pm$ 1,06 (ab)	-29,1 $\pm$ 1,04 (b)	0,015	-28,1 $\pm$ 0,48 (ab)	-28,5 $\pm$ 0,39 (bc)	-30 $\pm$ 0,53 (d)	-30,25 $\pm$ 0,4 (d)	-27,74 $\pm$ 0,39 (a)	-28,74 $\pm$ 0,31 (c)	< 0,01	0,818
<b>N total (%)</b>	2,47 $\pm$ 1,3	2,56 $\pm$ 1,5	2,77 $\pm$ 1,29	0,566	4,12 $\pm$ 1,15 (a)	1,6 $\pm$ 0,4 (b)	3,54 $\pm$ 0,42 (a)	3,64 $\pm$ 0,9 (a)	1,18 $\pm$ 0,24 (c)	1,53 $\pm$ 0,2 (b)	< 0,01	0,9

El  $^{13}\text{C}$  indica el dèficit hídric acumulat durant el creixement de la planta. En el cas del llaurat, es va veure que els cultius que van créixer amb règim de llaurada estripada van ser els que van patir més estrès hídric. En l'anàlisi de la quantitat d'aquest isòtop de C en funció del cultiu, es va observar que la civada és la que va tenir un major estrès, seguida de l'espelta i el favó. Els que van presentar uns valors més baixos de l'isòtop  $^{13}\text{C}$  van ser la llentia i la veça (Figura 13 i Taula 6).



**Figura 13.** Concentració de  $^{13}\text{C}$  a les fulles segons el tipus de llaurada i el cultiu.

La quantitat de l'isòtop  $^{15}\text{N}$  indica la procedència del nitrogen present a les fulles dels cultius. Si els nivells de  $\delta^{15}\text{N}$  són alts, vol dir que la majoria de N s'ha obtingut del sòl i no de fixació de N atmosfèric. A la Figura 14 s'observen diferències en la quantitat de  $\delta^{15}\text{N}$  en els diferents cultius, ja que les lleguminoses (favó, llentia i veça) presenten nivells de  $\delta^{15}\text{N}$  molt baixos, mentre que en els cereals (espelta, civada i ordi) la quantitat de  $\delta^{15}\text{N}$  es multiplica.



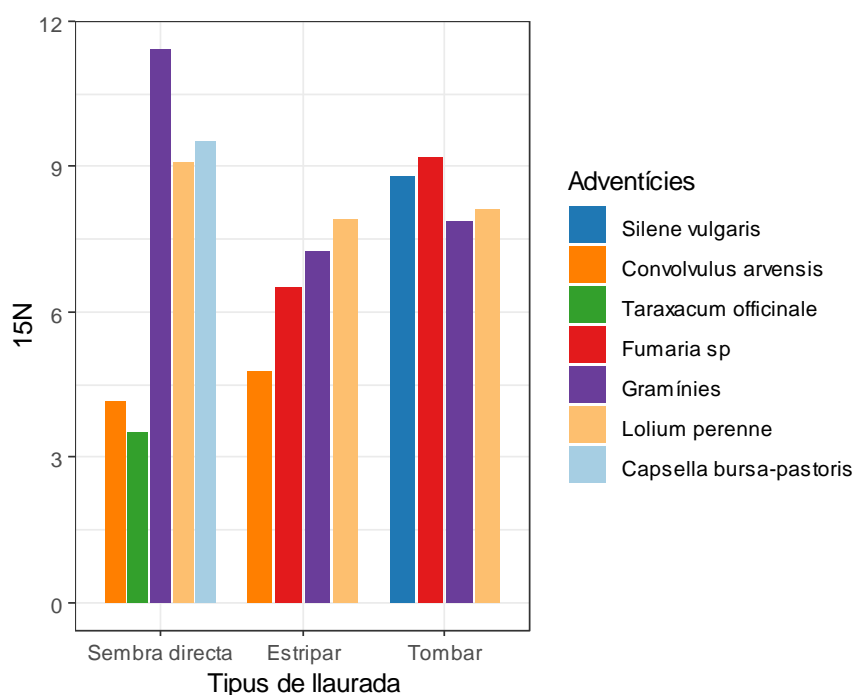
**Figura 14.** Concentració de  $^{15}\text{N}$  a les fulles segons el tipus de llaurada i el cultiu.

El nitrogen total en fulla indica l'estat nutricional de la planta, sobretot en conreus no lleguminosos. Els resultats (Taula 6) no mostren que hi hagués diferències significatives en la quantitat de N total a les fulles en funció de la intensitat de llaurada. En canvi, es va observar que les lleguminoses tenien més quantitat de N a la fulla que els cereals. La civada va ser el cultiu que va presentar la concentració de N més baixa.

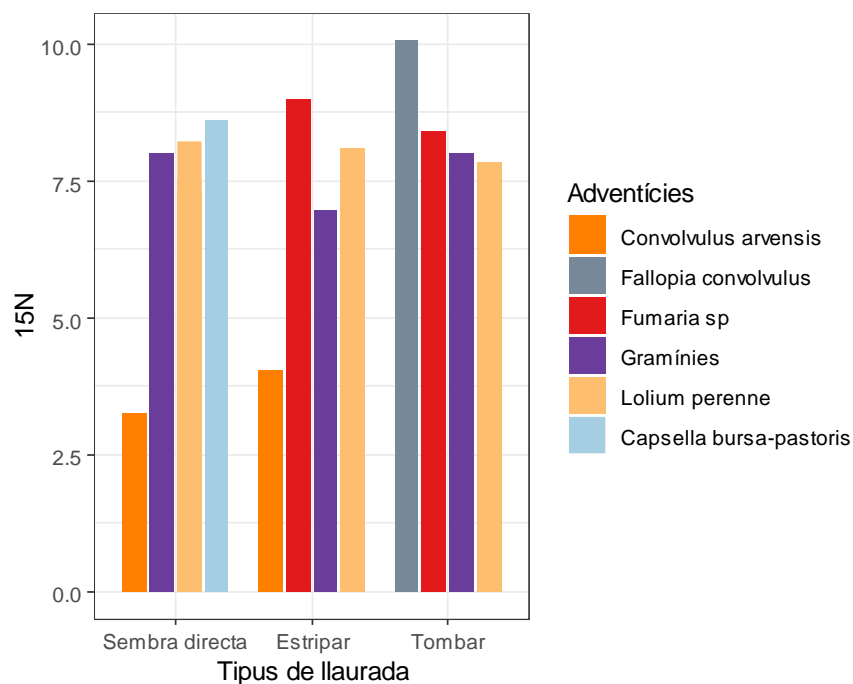
### Fixació de nitrogen

Es va calcular la quantitat de  $^{15}\text{N}$  a la fulla de les adventícies de favó i lletia. A les figures 15 i 16 es mostren els resultats d'aquestes anàlisis. Per les adventícies de la lletia, no es van observar diferències en la quantitat de  $^{15}\text{N}$  pel que al tipus de llaurada ( $p$ -valor = 0,063), però sí quant a les diferents espècies d'adventícies ( $p$ -valor < 0,01). Pel nivell de  $^{15}\text{N}$ , les adventícies de favó sí que van presentar diferències en relació amb la intensitat de llaurada ( $p$ -valor = 0,014) i en relació a les espècies d'adventícies ( $p$ -valor < 0,01). La corretjola és una de les plantes adventícies que va mostrar un percentatge menor de  $^{15}\text{N}$  respecte a les altres. La interacció entre l'espècie d'adventícia i la intensitat de llaurada no és un factor que es relacioni significativament amb els nivells de  $^{15}\text{N}$ .

A les figures 15 i 16 s'observa també que el *Lolium perenne* (margall) va estar present a totes les intensitats de llaurada. La *Capsella bursa-pastoris* (sarronet de pastor), en canvi, va estar només present en parcel·les amb sembra directa. La *Convolvulus arvensis* (corretjola) no estava present a les parcel·les amb més intensitat de llaurada (tombar), i la *Fumaria sp* va aparèixer a totes les intensitats de llaurada menys a les de sembra directa.



**Figura 15.** Comparació de la quantitat de  $^{15}\text{N}$  segons la intensitat de llaurada en les plantes adventícies de lletia.



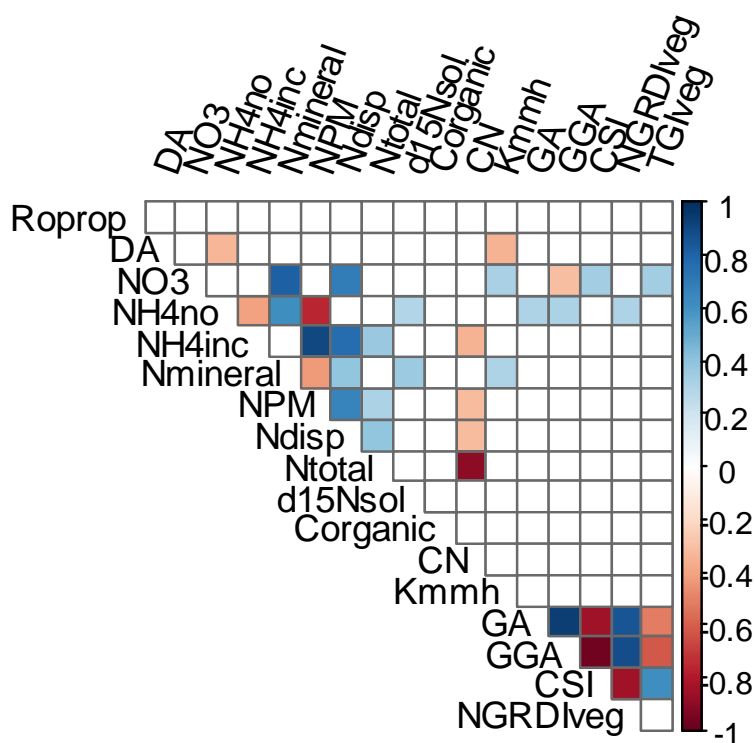
**Figura 16.** Comparació de la quantitat de  $^{15}\text{N}$  segons la intensitat de llaurada en les plantes adventícies de favó.

**Taula 7.** Mitjana del percentatge de N derivat de l'atmosfera (Ndda) de les fulles pels diferents tractaments de llaurada (SD, sembra directa; E, estripar; T, tombat) i les plantes dels cultius (favó, espelta, lletia, veça, civada, ordi). Els p-valors corresponen a una ANOVA pels factors llaurada, cultiu i la interacció entre llaurada i cultiu (LL x C).

	LLAURAT				CULTIU				Interacció LL x C
	SD	E	T	p-valor	Veça	Favó	Lletia	p-valor	p-valor
<b>Ndda (%)</b>	87,66 ± 6,91	84,59 ± 5,94	84,17 ± 7,69	0,479	83,77 ± 4,7	84,39 ± 7,78	88,26 ± 7,38	0,31	0,23

La intensitat de fixació de nitrogen de l'atmosfera de les lleguminoses (favó, lletia i veça) oscil·la entre el 80% i el 90% total que s'incorpora a la planta. En aquest cas es van calcular aquests valors a partir de les plantes adventícies de la mateixa parcel·la que no fixen nitrogen. No es van observar diferències en la fixació respecte a la intensitat de llaurada ni respecte a l'espècie de lleguminosa (Taula 7).

## Correlació entre les característiques del sòl i dels cultius



**Figura 17.** Matriu de correlacions de les propietats del sòl i els índexs de vegetació de tots els cultius (DA: densitat aparent; NH<sub>4</sub>no: NH<sub>4</sub><sup>+</sup> abans de la incubació; NH<sub>4</sub>inc: NH<sub>4</sub><sup>+</sup> després de la incubació; Nmineral: N mineral; NPM: N potencialment mineralitzable; Ndisp: N disponible; Ntotal; d15Nsol: <sup>15</sup>N present al sòl; C orgànic; CN: ràtio C/N; Kmmh: constant d'infiltració (mm/h); GA: Green Area; GGA: Green-Gray Area; CSI: Clorophyll Senescence Index; NGRDiveg: Normalized Green Red Difference Index - Vegetation; TGIveg: Triangular Greenness Index – Vegetation). Només es mostren les correlacions significatives (p-valor < 0,05). L'escala de colors indica la intensitat de la correlació segons la llegenda.

A la Figura 17 s'observa una correlació negativa de la densitat aparent i la infiltració d'aigua al sòl. A la vegada, la infiltració està correlacionada positivament de manera suau amb la quantitat de N mineral i la quantitat de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> del sòl, i la densitat aparent es correlaciona negativament amb el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> abans de la incubació.

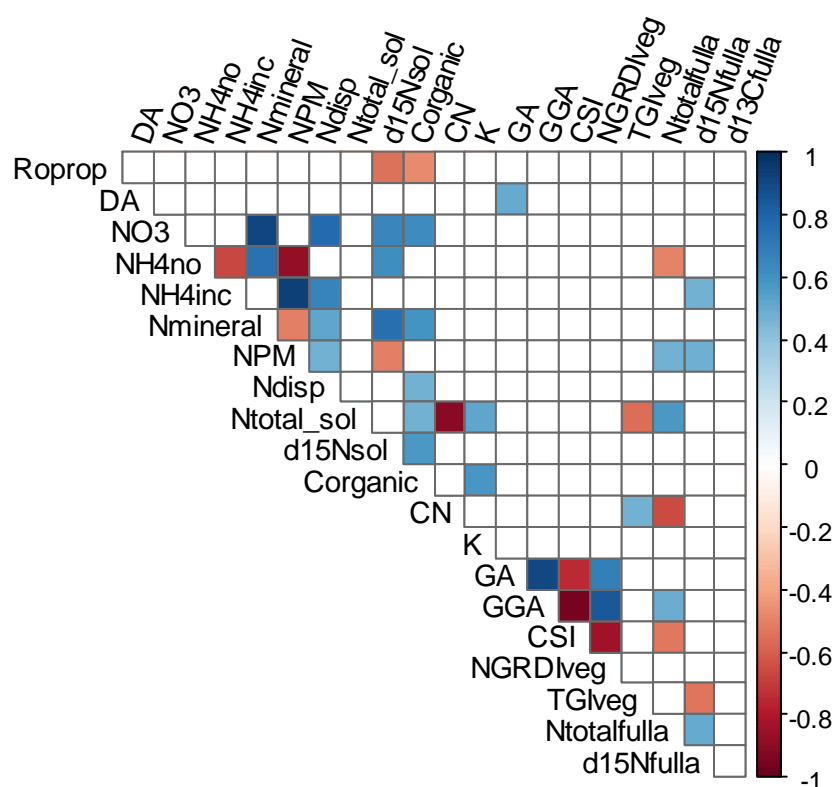
Es pot veure també que les diferents formes de N del sòl es correlacionen entre elles. Les correlacions positives i negatives més fortes es troben entre els paràmetres NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> sense incubació i NH<sub>4</sub><sup>+</sup> amb incubació i el N mineral, el NPM i el N disponible. Això passa perquè els tres primers s'utilitzen per calcular els 3 segons. Un efecte semblant el té la correlació negativa molt forta que hi ha entre la ràtio C/N i el N total.

S'observen correlacions molt marcades entre els índexs de vegetació. Els índexs GA i GGA estan molt positivament correlacionats. En canvi, s'observa que com més alts són els índexs GA i GGA, més baix és l'índex CSI. L'índex CSI es troba correlacionat positivament amb el TGIveg i negativament amb el NGRDiveg.



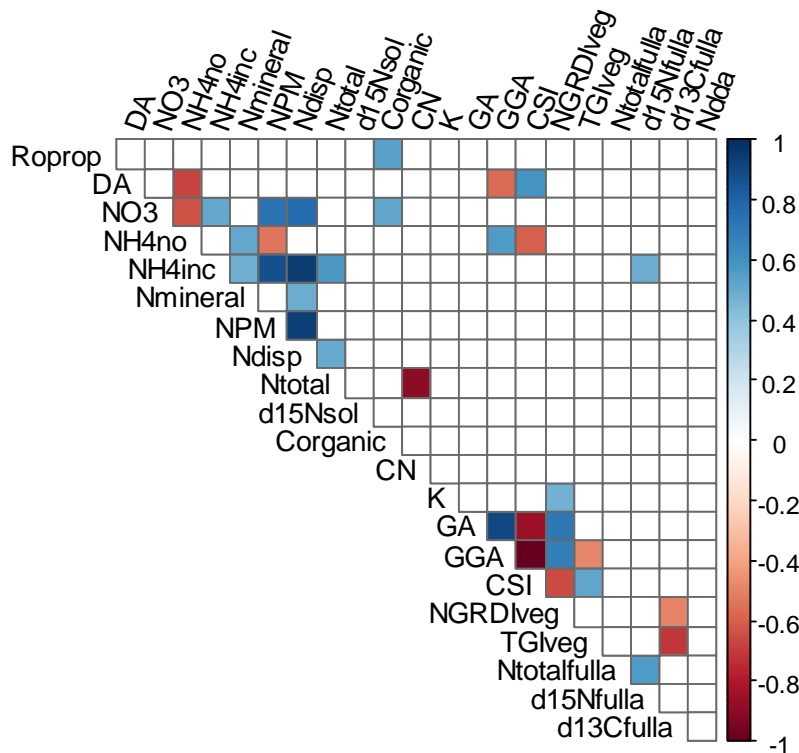
Els índexs GA, GGA i NGRDIveg es correlacionen positivament amb l'NH<sub>4</sub>no. En canvi, els índexs CSI i TGIveg es correlacionen de forma positiva amb els nivells de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> del sòl, mentre que l'índex GGA s'hi relaciona negativament.

Si s'analitzen les mateixes dades, però només pels resultats de cereals (Figura 18), i incorporant alguns paràmetres es pot conèixer la dinàmica d'aquests cultius. En primer lloc, no s'observen diferències en les correlacions entre els índexs de vegetació respecte als resultats de la Figura 17. El N total de la fulla es correlaciona negativament amb el NH<sub>4</sub>no, la ràtio C/N i l'índex CSI. En canvi, es correlaciona positivament amb el NPM, el N total al sòl i l'índex GGA. La quantitat de <sup>15</sup>N a la fulla es correlaciona positivament amb el NH<sub>4</sub>inc i el NPM, també amb la quantitat total de N de la fulla. Tot i això, es correlaciona negativament amb l'índex TGIveg.



**Figura 18.** Matriu de correlacions de les propietats del sòl (DA: densitat aparent; NH<sub>4</sub>no: NH<sub>4</sub><sup>+</sup> abans de la incubació; NH<sub>4</sub>inc: NH<sub>4</sub><sup>+</sup> després de la incubació; Nmineral: N mineral; NPM: N potencialment mineralitzable; Ndisp: N disponible; Ntotal; d15Nsol: <sup>15</sup>N present al sòl; C orgànic; CN: ràtio C/N; Kmmh: constant d'infiltració (mm/h)) i les propietats dels cultius de cereals (espelta i ordi) (GA: Green Area; GGA: Green-Gray Area; CSI: Clorophyll Senescence Index; NGRDIveg: Normalized Green Red Difference Index - Vegetation; TGIveg: Triangular Greenness Index - Vegetation, Ntotalfulla: N total de la fulla; d15Nfulla: <sup>15</sup>N de la fulla, d13Cfulla: <sup>13</sup>C de la fulla). Només es mostren les correlacions significatives (p-valor < 0,05). L'escala de colors indica la intensitat de la correlació segons la llegenda.

A la Figura 19 s'analitza el mateix però només per les dades de lleguminoses. El <sup>15</sup>N de la fulla es correlaciona positivament en aquest cas amb el NH<sub>4</sub>inc del sòl i amb el N total de la fulla. El contingut de <sup>13</sup>C de la fulla es correlaciona negativament amb els índexs NGRDIveg i TGIveg. La intensitat de fixació de nitrogen atmosfèric de les lleguminoses no presenta cap correlació, ni negativa ni positiva, amb cap dels paràmetres estudiats.



**Figura 19.** Matriu de correlacions de les propietats físico-químiques del sòl i les propietats dels cultius de lleguminoses (lletia i favó). Només es mostren les correlacions significatives ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). L'escala de colors indica la intensitat de la correlació segons la llegenda.

## 5 DISCUSSIÓ

### 5.1 Canvis en la qualitat del sòl a curt termini

#### Canvis físics

La intensitat de llaurada que s'aplica a un camp té moltes implicacions sobre els diferents paràmetres del sòl, i pot contribuir molt positivament a regular les funcions del sòl (Busari et al, 2015). Tot i això, l'augment de la qualitat del sòl depèn de les condicions d'aquest i és específic per cada lloc. Toth et al. (2024) van realitzar un estudi a Àustria on es comparava la qualitat del sòl d'un camp amb sembra directa i un camp amb llaurada convencional durant vint anys. Es va notar un augment significatiu de la qualitat dels 20 cm superficials del sòl a la parcel·la amb sembra directa, sobretot per un augment del C orgànic i una millora dels indicadors físics. En un altre estudi dut a terme al nord de la Xina es va observar una millora de la quantitat d'aigua i les condicions de nutrients del sòl després de deu anys d'aplicar un tractament de sembra directa als camps (Deng et al., 2022).

Al camp del Pallars no es va poder estudiar l'efecte de la llaurada a llarg termini, ja que les mostres de sòl es van prendre només uns dies després d'aplicar els tractaments de llaurada. Tot i això, es va observar que a curt termini van canviar les propietats físiques del sòl a causa dels canvis mecànics que va produir la llaurada. En primer lloc, s'ha vist que les parcel·les on es va aplicar sembra directa tenien una densitat aparent més alta que la resta de tractaments, perquè

el sòl estava més compactat que aquell que s'havia llaurat. En aquestes parcel·les la infiltració d'aigua al sòl era més baixa, fet que possiblement va afectar la disponibilitat d'aigua per les plantes. La densitat aparent més baixa va ser la del tractament tombat, que consisteix en voltejar la terra, i per tant és el que té un major impacte sobre l'estructura del sòl. El tractament de llaurada estripat, que té un impacte moderat a l'estructura del sòl, va presentar valors de densitat intermèdia entre sembra directa i tombat. Així doncs, es va observar que com major és l'impacte de la llaurada sobre l'estructura del sòl, més baixa és la densitat aparent. A més, la llaurada augmenta la infiltració d'aigua al sòl, tot i que no es van observar diferències en aquest aspecte entre els dos tipus de llaurada (tombat i estripat). Queda per veure com evoluciona el sòl dels diferents tractaments de llaurada amb el temps.

### **Canvis en la disponibilitat nutrients**

En alguns estudis a llarg termini s'ha vist que el C orgànic del sòl augmenta en camps de conreu sense llaurada (Peng et al., 2024; Toth et al., 2024) i aquestes condicions promouen la seva estabilitat (Han et al., 2024). L'estudi del Pallars no va mostrar diferències quant al C orgànic del sòl en funció del règim de llaurada, ja que es va realitzar abans d'aplicar el cultiu. Així doncs, els resultats mostren que el C orgànic que hi havia al sòl no varia en funció del tipus de llaurada a curt termini, sinó que segons les dades recollides per altres estudis, el fet de no destorbar l'estructura del sòl permet retenir millor el C orgànic i millorar les condicions del sòl a llarg termini. Cal destacar que els sòls del camp d'estudi presenten percentatges alts de C orgànic, que oscil·len entre el 2,43 i el 2,46%.

L'augment del C orgànic en sòls tractats amb sembra directa pot fer augmentar el N potencialment mineralitzable, segons Canisares et al. (2021), que van realitzar un estudi on s'avaluava la qualitat del sòl al cap de quaranta-vuit anys d'aplicar la no llaurada. Els resultats que van obtenir van ser que la sembra directa a llarg termini feia augmentar la mineralització de N del sòl i la producció dels cultius.

Al camp del Pallars, la llaurada no va tenir un efecte directe sobre la quantitat total de N, ja que s'observen les mateixes concentracions en tots els sòls. Es va veure que els canvis principals en la disponibilitat de compostos de N es trobaven sobretot en el contingut d' $\text{NH}_4^+$  inicial i  $\text{NO}_3^-$  del sòl. L' $\text{NH}_4^+$  i  $\text{NO}_3^-$  inicials eren màxims en el tractament estripat, per tant, hi havia més risc de pèrdues de nutrients per lixiviació. A la sembra directa hi havia menys nitrats, per tant, menys risc de pèrdues per lixiviació, i més NPM, per tant, més contribució de la comunitat bacteriana en la disponibilitat de nitrogen. Aquests resultats indiquen que el fet de voltejar la terra va promoure la transformació de N orgànic a formes minerals.

La zona d'estudi tenia homogeneïtat quant a matèria orgànica i N total. La intensitat de llaurada va tenir un efecte directe sobre les propietats físiques del sòl i un efecte sobre la comunitat microbiana capaç de proporcionar nutrients a les plantes. Altres factors que podrien haver afectat els resultats són la pluviometria de la zona. També cal tenir en compte que les dades dels cultius no estan estandarditzades, i els cultius diferents podrien tenir efectes diferents amb el mateix mètode.

## 5.2 Resposta dels cultius a la intensitat de llaurada

S'ha vist un efecte diferencial de la intensitat de llaurada en algunes de les propietats analitzades pels diferents cultius de veça amb civada, favó, lletia, espelta i ordi. En general, s'ha observat un recobriment vegetal major en els sòls amb més intensitat de llaurada, que disminueix a mesura que la llaurada és menys intensa. Això es podria deure al fet que un major esponjament del sòl (densitat aparent més baixa) va facilitar el creixement de les plantes de l'estudi. Un altre punt a tenir en compte seria que la correlació entre la densitat aparent i la infiltració és negativa, això indica que com més esponjada sigui la terra, millor s'infiltra l'aigua.

S'han observat resultats contradictoris en diversos estudis, ja que n'hi ha que diuen que la no llaurada augmenta la producció respecte a la llaurada convencional (Lv et al., 2024). A la vegada, hi ha altres estudis que tenen resultats semblants als d'aquest i asseguren que no llaurar la terra té efectes perjudicials sobre creixement dels cultius, per exemple l'estudi de Jokela i Nair (2016) o el metaanàlisi de Dou et al. (2024).

Les intensitats de llaurada on es va observar menys recobriment (SD) són també les que tenen major índex CSI, i per tant, a les que les plantes van estar més estressades. Aquest estrès també es nota en els valors de  $^{13}\text{C}$  de les fulles, que van ser més alts a la sembra directa, indicant estrès del cultiu al llarg del seu creixement. Amb aquesta informació es pot afirmar que les parcel·les que no es van llaurar, pel fet de tenir la terra menys esponjada i una infiltració d'aigua menor, van provocar que els cultius cresquessin menys i més estressats.

Per altra banda, en aquest estudi no es van observar diferències en els nivells de  $^{15}\text{N}$  a la fulla dels cultius en funció de la llaurada. En altres estudis tampoc es van observar diferències en aquest aspecte (Zhang et al., 2022). Així doncs es podria dir que mentre que la intensitat de llaurada va afectar el creixement dels cultius, el seu efecte no va ser prou gros per canviar la capacitat de captar  $^{15}\text{N}$  del sòl. Soon i Calyton (2002) ja van observar que el tipus de llaurada no tenia efecte sobre la quantitat de N que es trobava al cultiu. D'acord amb l'estudi de Soon i Clayton, el contingut total de N als cereals tampoc canvia en funció del règim de llaurada aplicat, a més, s'ha observat que aquest paràmetre no està correlacionat amb el N disponible al sòl.

### Resposta dels cereals

Els cereals en monocultiu que es van utilitzar van ser l'ordi i l'espelta. Aquestes dues espècies presentaven en el moment de presa de mostres un recobriment menor en general que la resta de cultius estudiats, acompanyat de senescència alta de les fulles. Els cereals en general no tenen la capacitat de fixar N de l'atmosfera, i presenten valors de  $^{15}\text{N}$  més alts que les lleguminoses, ja que la seva font principal de N és el sòl. Un estudi de Larsson et al. (2024) mostra que els nivells de  $^{15}\text{N}$  en el gra dels cereals pot dependre del fertilitzant i de la densitat de plantes, entre d'altres. Tot i això, en l'estudi que ens ocupa aquests ítems no van afectar la concentració de  $^{15}\text{N}$ , ja que no es van observar diferències significatives en la concentració de  $^{15}\text{N}$  dels cultius. Així doncs, les dues espècies de cereals estudiades en les condicions del camp d'estudi van captar el N del sòl de formes semblants.

El N total de la fulla indica el bon estat de la planta, i per tant el seu correcte creixement. L'índex GGA està correlacionat positivament amb el contingut de N total de la fulla, i a la vegada, l'índex CSI es correlaciona negativament amb el contingut total de N de la fulla. En aquest cas, l'espelta

va presentar un índex de senescència mitjà i l'ordi alt, fet que es correlaciona amb els nivells mitjans de N total de les fulles d'ordi i espelta.

En el cas dels cereals, les propietats inicials del sòl després de la llaurada no van tenir un efecte directe sobre el color de les fulles. Tot i això, sí que es va poder observar certa relació amb la composició d'aquestes. Es va observar que a més amoni al sòl després de la incubació d'aquest, és a dir, després que els bacteris hi actuessin, i també a més NPM, la quantitat de  $^{15}\text{N}$  a les fulles era més alt. Aquesta relació indica que el N del sòl en forma d'amoni s'estava utilitzant de forma efectiva per part dels cereals.

Els valors alts de NPM es correlacionen positivament també amb el N total de la fulla dels cereals. Per tant, l'activitat microbiana és un factor a tenir en compte a l'hora d'assegurar una bona nutrició dels cultius. En aquest cas, els nivells de N total del sòl també tenen una relació positiva amb la quantitat de N de les fulles. Una altra relació interessant es troba entre el  $\text{NH}_4^+$  sense incubar del sòl i el N total de la fulla, que té una relació negativa. Aquestes dades donen consistència a l'afirmació que l'activitat microbiana va ser fonamental perquè els cultius de cereal poguessin aprofitar el N en forma d' $\text{NH}_4^+$  del sòl.

### **Resposta de les lleguminoses**

Les lleguminoses tenen una capacitat bàsica, que és la de fixar nitrogen atmosfèric mitjançant l'associació simbiòtica de bacteris del gènere *Rhizobium* en nòduls a les seves arrels. Així doncs, el seu estat de nutrició no depèn tant del N del sòl com el dels cereals. En l'estudi realitzat les dades indiquen que no hi ha cap paràmetre del sòl que hagi tingut un efecte directe, positiu o negatiu, sobre el nitrogen total de la fulla de lleguminosa. Ara bé, s'observa una relació positiva entre els nivells de  $^{15}\text{N}$  de la fulla i els nivells de  $\text{NH}_4^+$  del sòl després de la incubació. Aquesta relació indica que les lleguminoses són capaces d'agafar N en forma d'amoni del sòl i incorporar-lo al seu organisme, ja que no hi ha cap evidència que cap cultiu de lleguminosa pugui satisfer els seus requisits de nitrogen únicament amb la fixació (Larue & Patterson, 1981).

De la mateixa manera que l'amoni després de la incubació del sòl té relació positiva amb l'estat de nutrició de les fulles de lleguminosa, els resultats van mostrar un augment de recobriment en presència de  $\text{NH}_4$  sense incubació. Així doncs, la presència de N en diferents formes al sòl va provocar l'augment de la quantitat i qualitat de lleguminosa. A la vegada, respecte a les propietats del sòl, una densitat aparent del sòl alta va suposar una rebaixa de la densitat de lleguminosa, i una alta infiltració de l'aigua de la pluja va fer augmentar la salut del cultiu.

Segons els resultats d'aquest estudi, les lleguminoses depenen en part del N del sòl, però els seus nivells de  $^{15}\text{N}$  (N procedent del sòl) són molt més baixos que els dels cereals. És per això que el més important és la intensitat amb la qual poden captar nitrogen derivat de l'atmosfera, ja que d'això dependrà en part el seu estat de nutrició. En aquest estudi, les tres espècies de lleguminoses estudiades (veça, llentia i favó) no van presentar diferències en la seva capacitat de captar N de l'atmosfera. En un estudi realitzat a Córdoba, es va observar una fixació de nitrogen atmosfèric major en sòls amb sembra directa que en sòls amb llaurada convencional, a més, hi havia diferència de fixació entre les espècies estudiades (López-Bellido et al., 2011). En l'estudi actual, en canvi, es va observar que la intensitat de captació de N és independent al tractament de llaurada de la terra, a l'estat de salut de les plantes, i a qualsevol dels paràmetres, físics o químics, del sòl.

Els nivells d'estrès hídric de les lleguminoses van dependre de l'espècie. El favó va presentar un estrès hídric més elevat que el de la majoria d'altres cultius, en canvi, la lletia i la veça van ser les que van presentar un estrès hídric més baix. Això podria indicar que la lletia i la veça tenen un avantatge comparatiu en l'escenari de canvi climàtic amb un augment de la freqüència de sequeres. No obstant això, s'haurien de comparar diferents varietats dels cultius per treure conclusions més robustes.

### **Resposta del policultiu (veça amb civada)**

El policultiu és un sistema de conreu que vol maximitzar la resiliència de l'agricultura amb la diversificació dels cultius. El policultiu de veça (lleguminosa) i civada (cereal) va presentar uns valors de recobriment semblants als dels cereals, més baixos als de les lleguminoses. A més, la senescència de les fulles del cultiu va ser elevada. La veça és la lleguminosa que va presentar menys estrès hídric d'entre els cultius estudiats, juntament amb la lletia. Per contra, la civada va presentar major estrès hídric. Així doncs, a primera vista el policultiu no va presentar millors condicions que els altres monocultius estudiats, ja que no es va disminuir la senescència de les fulles, no es va augmentar significativament el recobriment i tampoc hi va haver canvis positius en l'estrès hídric.

Es va observar que la quantitat de  $^{15}\text{N}$  va ser la mateixa per totes les lleguminoses, inclosa la veça. També va ser major per tots els cereals, inclosa la civada. Així doncs, la unió dels dos cultius a la mateixa parcel·la no va representar tampoc un canvi en l'efecte fixador de N. A més, la veça va captar nitrogen atmosfèric a la mateixa intensitat que el favó i la lletia. En un estudi de Fan et al. (2006) es plantejava que una lleguminosa podria guanyar o perdre productivitat en termes de fixació de nitrogen en diferents situacions de policultiu i de monocultiu. Per acabar de determinar l'efecte del policultiu de veça amb civada s'haurien d'incloure altres combinacions de cultius, com per exemple monocultiu de veça o policultiu de veça amb algun altre tipus de cereal.

## **6 CONCLUSION**

Tillage has short-term effects on the soil, which are based on the physical changes that occur in the soil due to mechanical action. The greater the tilling intensity, the fluffier the soil and the better the water infiltrates. However, the activity of the soil microbial community decreases at high tillage intensities. The results of the chemical properties of the soil show heterogeneity in the field of study, but not a clear trend in relation to tillage.

Changes in the physical properties of the soil influence crop growth, as plants grow more and under less stress in plowed soils. The good health of the microbial community (untilled soils, which maintain a good structure) has a positive effect on the uptake of N from the soil in cereals, but there are no differences in the uptake of N from the atmosphere by legumes. Additionally, there is no specific species that shows an improvement in productivity and quality in a no-till regime.

Finally, direct seeding is not the treatment that achieves better balance between soil quality and crop productivity in the short term. Medium or long-term studies would be necessary to observe significant results.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- Altieri, M. A. (2002). Agroecology: The science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93(1-3), 1-24. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00085-3)
- Armengol, À. (2014). *Comarca del Pallars Jussà*.
- Baker, C., Justice, S., Saxton, K., Hobbs, P., Ritchie, W., Chamen, W., Reicosky, D., i Ribeiro, F. (2006). *No Tillage Seeding in Conservation Agriculture* (2.<sup>a</sup> ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845931162.0000>
- Ball, B. C., Batey, T., i Munkholm, L. J. (2007). Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use and Management*, 23(4), 329-337. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x>
- Busari, M. A., Kukal, S. S., Kaur, A., Bhatt, R., i Dulazi, A. A. (2015). Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(2), 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002>
- Canisares, L. P., Grove, J., Miguez, F., i Poffenbarger, H. (2021). Long-term no-till increases soil nitrogen mineralization but does not affect optimal corn nitrogen fertilization practices relative to inversion tillage. *Soil and Tillage Research*, 213, 105080. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105080>
- Cannell, R. Q. (1985). Reduced tillage in north-west Europe—A review. *Soil and Tillage Research*, 5(2), 129-177. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(85\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(85)90028-5)
- Deng, F., Wang, H., Xie, H., Xuelian, B., Hongbo, H., Zhang, X., i Liang, C. (2022). Low-disturbance farming regenerates healthy deep soil toward sustainable agriculture—Evidence from long-term no-tillage with stover mulching in Mollisols. *Science of The Total Environment*, 825, 153929. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153929>
- Doran, J. W., i Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15(1), 3-11. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6)
- Dou, S., Wang, Z., Tong, J., Deng, A., Song, Z., i Zhang, W. (2024). Strip tillage promotes crop yield in comparison with no tillage based on a meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 240, 106085. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106085>
- Elshikha, D. E. M. (2022). Estimation of direct-seeded guayule cover, crop coefficient, and yield using UAS-based multispectral and RGB data. *Agricultural Water Management*, 265, 107540. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107540>
- Enciclopèdia Catalana. (s.d.). *Breu història de l'agricultura*. <https://www.enciclopedia.cat/enciclopedia-tematica-proa/breu-historia-de-lagricultura>
- Espluga, P. (2018, desembre 12). *S'ha tornat l'agricultura incompatible amb la vida rural?* La Conca 5.1. <https://www.laconca51.cat/sha-tornat-agricultura-incompatible-vida-rural/>

- Fan, F., Zhang, F., Song, Y., Sun, J., Bao, X., Guo, T., i Li, L. (2006). Nitrogen Fixation of Faba Bean (*Vicia faba* L.) Interacting with a Non-legume in Two Contrasting Intercropping Systems. *Plant and Soil*, 283(1), 275-286. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-0019-y>
- Fang, C., Yang, Y., Zhang, S., He, Y., Pan, S., Zhou, L., Wang, J., i Yang, H. (2024). Unveiling the impact of microplastics with distinct polymer types and concentrations on tidal sediment microbiome and nitrogen cycling. *Journal of Hazardous Materials*, 472, 134387. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134387>
- FAO. (s.d.). *Planificación del uso del agua en fincas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. [https://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm](https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm)
- Faulkner, E. (1943). *Plowman's Folly*.
- Fontseca, G. (2024). *L'efecte Pallars: De l'embranchida econòmica fins a la comarca més feminista*. Via empresa. [http://www.viaempresa.cat/economia/efecte-pallars-embranchida-economica-fins-comarca-mes-feminista\\_2196115\\_102.html](http://www.viaempresa.cat/economia/efecte-pallars-embranchida-economica-fins-comarca-mes-feminista_2196115_102.html)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (s. d.). *Conservation Agriculture* <https://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>
- Generalitat de Catalunya. (s.d.). *Visor de mapes. SIG Gencat*. <https://sig.gencat.cat/iframeVisorACT/?language=ca&mode=static>
- Hallama, M., Pekrun, C., Lambers, H., i Kandeler, E. (2019). Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant and Soil*, 434(1), 7-45. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3810-7>
- Hamdane, Y., Segarra, J., Buchaillet, M. L., Rezzouk, F. Z., Gracia-Romero, A., Vatter, T., Benfredj, N., Hameed, R. A., Gutiérrez, N. A., Torró Torró, I., Araus, J. L., i Kefauver, S. C. (2023). Using Ground and UAV Vegetation Indexes for the Selection of Fungal-Resistant Bread Wheat Varieties. *Drones*, 7(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/drones7070454>
- Han, M., Zhang, H., Liu, M., Tang, J., Guo, X., Ren, W., Zhao, Y., Yang, Q., Guo, B., Han, Q., Feng, Y., Feng, Z., Wu, H., Yang, X., i Kong, D. (2024). Increased dependence on nitrogen-fixation of a native legume in competition with an invasive plant. *Plant Diversity*. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2024.04.003>
- Han, Z., Wu, X., Liang, A., Li, S., Gao, H., Song, X., Liu, X., Jia, A., i Degré. (2024). Conservation tillage enhances the sequestration and iron-mediated stabilization of aggregate-associated organic carbon in Mollisols. *CATENA*, 243, 108197. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108197>
- Hartmann, M., i Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1), 4-18. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>
- Hemkemeyer, M., Schwalb, S. A., Heinze, S., Joergensen, R. G., i Wichern, F. (2021). Functions of elements in soil microorganisms. *Microbiological Research*, 252, 126832. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126832>



- Hobbs, P. R., Sayre, K., i Gupta, R. (2007). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 543-555. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
- Husk, B. R., Anderson, B. C., Whalen, J. K., i Sanchez, J. S. (2017). Reducing nitrogen contamination from agricultural subsurface drainage with denitrification bioreactors and controlled drainage. *Biosystems Engineering*, 153, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.021>
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. (s.d.). VISSIR. <http://www.icc.es/vissir3/>
- Jokela, D., i Nair, A. (2016). Effects of reduced tillage and fertilizer application method on plant growth, yield, and soil health in organic bell pepper production. *Soil and Tillage Research*, 163, 243-254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.06.010>
- Jr, E., Doraiswamy, P., McMurtrey, J., Daughtry, C., Perry, E., i Akhmedov, B. (2013). A visible band index for remote sensing leaf Chlorophyll content at the Canopy Scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020>
- Khosravi, V., Gholizadeh, A., Žižala, D., Kodešová, R., Saberioon, M., Agyeman, P. C., Vokurková, P., Juřicová, A., Spasić, M., i Borůvka, L. (2024). On the impact of soil texture on local scale organic carbon quantification: From airborne to spaceborne sensing domains. *Soil and Tillage Research*, 241, 106125. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106125>
- Kladivko, E. J., Hunsaker, D. J., Waller, P. M., Thorp, K. R., Dierig, D., Wang, G., Cruz, V. M. V., Katterman, M. E., Bronson, K. F. B., Wall, G. W., i Thompson, A. L. (2001). Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research*, 61(1), 61-76. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00179-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00179-9)
- Larsson, M., Bergman, J., i Olsson, P. A. (2024). Soil, fertilizer and plant density: Exploring the influence of environmental factors to stable nitrogen and carbon isotope composition in cereal grain. *Journal of Archaeological Science*, 163, 105935. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2024.105935>
- Larue, T. A., i Patterson, T. G. (1981). How Much Nitrogen do Legumes Fix? *Advances in Agronomy* (Vol. 34, pp. 15-38). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60883-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60883-4)
- Lichtenberg, E. (2024). Thinking about soil health: A conceptual framework. *Soil Security*, 14, 100130. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100130>
- Liu, J., Fan, X., Li, X., Zheng, Y., Li, Y., Cui, C., Bai, Z., Ma, L., Zhai, B., Li, Z. (2024). Responses of different agricultural structures to nitrogen loss and agricultural green development in Northwest China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 367, 108956. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108956>
- Lluch, G. (2023, novembre 14). *Els cultius experimentals del Jussà constaten que l'espelta s'adapta millor als diferents tipus de llaurada—Pirineus Digital*. <https://pirineusdigital.cat/2023/11/14/els-cultius-experimentals-del-jussa-constaten-que-lespelta-sadapta-millor-als-diferents-tipus-de-llaurada/>

- López-Bellido, R., López-Bellido, L., Benítez-Vega, J., Muñoz-Romero, V., López-Bellido, F. J., i Redondo, R. (2011). Chickpea and faba bean nitrogen fixation in a Mediterranean rainfed Vertisol: Effect of the tillage system. *European Journal of Agronomy*, 34(4), 222-230. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.01.005>
- Lv, W.-J., Zhang, X.-L., Gong, L., Huang, S.-B., Sun, B.-L., Zheng, J.-Y., i Wang, L.-C. (2024). Long-term reduced and no tillage increase maize (*Zea mays* L.) grain yield and yield stability in Northeast China. *European Journal of Agronomy*, 158, 127217. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127217>
- Magdoff, F. (2007a). Ecological agriculture: Principles, practices, and constraints. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 22(2), 109-117. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001846>
- Mamabolo, E., Gaigher, R., i Pryke, J. S. (2024). Conventional agricultural management negatively affects soil fauna abundance, soil physicochemical quality and multifunctionality. *Pedobiologia*, 104, 150961. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2024.150961>
- Palermo, F., Fernandez, J. A., Garcia, F. O., Jaro, R., Prasad, P. V. V., Salvagotti, F., i Ciampitti. (2022). A quantitative review into the contributions of biological nitrogen fixation to agricultural systems by grain legumes. *European Journal of Agronomy*, 136, 126514. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126514>
- Peng, Y., Chahal, I., i Van Eerd, L. L. (2024). Comparison of equivalent soil mass approaches to estimate soil organic carbon stocks under long-term tillage. *Soil and Tillage Research*, 238, 106021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106021>
- Pereira, H. C. (1975). Agricultural science and the traditions of tillage. *Outlook on Agriculture*, 8(1\_suppl), 211-212. <https://doi.org/10.1177/003072707500801S01>
- Reguant, F. (2018, març 21). *Reinventar el passat o inventar el futur*. Via empresa. [http://www.viaempresa.cat/opinio/francesc-reguant-agricultura-passat-futur\\_53242\\_102.html](http://www.viaempresa.cat/opinio/francesc-reguant-agricultura-passat-futur_53242_102.html)
- Soon, Y. K., i Clayton, G. W. (2002). *Eight years of crop rotation and tillage effects on crop production and N fertilizer use*. Recuperat 27 de juny de 2024, de <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.4141/S01-047>
- Servei Meteorològic de Catalunya. (s.d.). *Climatologies comarcals*. <https://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/el-clima/climatologies-comarcals/>
- Thierfelder, C., i Wall, P. C. (2009). Effects of conservation agriculture techniques on infiltration and soil water content in Zambia and Zimbabwe. *Soil and Tillage Research*, 105(2), 217-227. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.07.007>
- Toth, M., Stumpp, C., Klik, A., Strauss, P., Mehdi-Schulz, B., Liebhard, G., i Strohmeier, S. (2024). Long-term effects of tillage systems on soil health of a silt loam in Lower Austria. *Soil and Tillage Research*, 241, 106120. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106120>
- Triplett Jr., G. B., i Dick, W. A. (2008). No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture! *Agronomy Journal*, 100(S3), S-153-S-165. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0005c>

Pirineus Digital. (2022, 9 febrer). Un estudi constata que el canvi climàtic pot complicar els conreus del Jussà i ampliar els del Sobirà. Pirineus Digital. <https://pirineusdigital.cat/2022/02/09/un-estudi-constata-que-el-canvi-climatic-pot-complicar-els-conreus-del-jussa-i-ampliar-els-del-sobira/>

Unkovich, M., Herridge, D., Peoples, M., Cadisch, G., Boddey, B., Giller, K., et al. (2008). *Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems Aciar Monograph Series*.

Yang, J. E., Kim, J. J., Skogley, E. O., i Schaff, B. E. (1998). A Simple Spectrophotometric Determination of Nitrate in Water, Resin, and Soil Extracts. *Soil Science Society of America Journal*, 62(4), 1108-1115. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200040036x>

Zhang, M., Hou, R., Li, T., Fu, Q., Zhang, S., Su, A., Xue, P., i Yang, X. (2022). Study of soil nitrogen cycling processes based on the <sup>15</sup>N isotope tracking technique in the black soil areas. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134173>