



Proyecto de Carbono en
Sistemas Agropecuarios

Huella de Carbono en Sistemas Agropecuarios

INFORME DE HUELLA DE CARBONO

ESTABLECIMIENTOS DE GRANOS



Noviembre 2024



Con el apoyo de:



Responsables del proyecto



Luis Maria Arias Usandivaras, Diana de Salazar

Contenido

Introducción	4
Marco Teórico	4
Concepto de Huella de Carbono	4
Factores que Contribuyen a la Huella de Carbono en Sistemas de Granos	7
Metodología de Evaluación	7
Selección de los Establecimientos	7
Datos Recolectados	7
Herramienta Utilizada.....	8
Método de Cálculo	8
Fuente de información del cálculo.....	9
Periodo de Análisis	9
Resultados	9
Resultados generales	9
Emisiones totales por cultivo por hectárea	9
Huella de carbono: Emisiones totales por tonelada producida	11
Contribución de las distintas fuentes de emisiones	11
Trigo.....	12
Soja.....	14
Maíz	15
Discusión y conclusión.....	17

Introducción

La **huella de carbono** es una medida clave para evaluar el impacto ambiental de las actividades humanas. En el sector agropecuario, las emisiones derivadas del uso de insumos, maquinaria, transporte y prácticas de manejo del suelo son relevantes para poder tener en cuenta mejoras a futuro dentro del establecimiento.

En este informe, se presenta un **análisis de la huella de carbono en los sistemas de granos** que participan del **Proyecto Carbono en Sistemas Agropecuarios**.

El objetivo es **cuantificar la huella de carbono de diferentes sistemas de producción de granos**, con el fin de proporcionar una base de datos que permita conocer las emisiones asociadas a estas prácticas y brindar una visión general del impacto ambiental de estos sistemas.

Este análisis se llevará a cabo a través de la recolección de datos específicos de cada establecimiento agrícola seleccionado, utilizando una planilla de recolección de datos y siendo procesado a través de la **Calculadora de Huella de Carbono de CREA**.

Los resultados obtenidos permitirán identificar las principales fuentes de emisiones en cada caso, lo cual será útil para discutir futuras estrategias de reducción de huella de carbono.

Marco Teórico

Concepto de Huella de Carbono

La **huella de carbono**, es un indicador clave para evaluar y mitigar el impacto ambiental. Se refiere a la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxidos de nitrógeno (N₂O), entre otros, generados de forma directa o indirecta por una actividad o proceso (Figura 1). Se realiza considerando los gases emitidos y absorbidos en un periodo específico dentro de un área determinada.

En este análisis, se incluyen exclusivamente las **emisiones** y absorciones antropogénicas relacionadas con actividades humanas, centradas en procesos agrícolas **directos** como el uso de maquinaria, la aplicación de fertilizantes y fitosanitarios, el manejo del suelo y los residuos de cosecha, entre otros.

Por otro lado, se consideran las **emisiones indirectas** derivadas de la producción de insumos empleados en el establecimiento, como fertilizantes, fitosanitarios y combustibles, además de la generación de energía eléctrica utilizada en las operaciones.



Figura 1: Distintos alcances de la huella de carbono. Elaboración propia

Las **emisiones totales** corresponden a la suma absoluta de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos directa o indirectamente. Este valor es clave para entender el impacto general de las actividades agrícolas, ya que incluye todas las fuentes de emisiones, expresándose en términos absolutos (por ejemplo, en kg o toneladas de CO_2 equivalente).

Al hablar de huella de carbono, es importante distinguir entre dos enfoques: por producto y por organización.

Un **reporte por producto** detalla las emisiones asociadas exclusivamente a un cultivo o bien, expresadas generalmente por tonelada de producción ($\text{kg CO}_2\text{eq/ton}$). Esto significa que la huella de carbono toma las emisiones totales y las divide por el rendimiento del sistema, dando como resultado un valor representado en $\text{kg CO}_2 \text{ eq/ton}$. Este enfoque permite evaluar la eficiencia de un sistema productivo, facilitando comparaciones entre diferentes cultivos o prácticas de manejo y brindando una visión más ajustada al rendimiento.

En cambio, un **reporte por organización** abarca todas las actividades de un establecimiento, permitiendo una visión integral de las emisiones generadas. Ambos enfoques son complementarios y brindan perspectivas valiosas para avanzar hacia sistemas agropecuarios más sostenibles.

En el caso de este informe, la huella de carbono, se mide calculando las emisiones de gases de efecto invernadero **por producto, desde la cuna a la tranquera** (Figura 2).



Figura 2: Alternativas para la huella de carbono reportada por producto

Para estimar la huella de carbono, se utilizan datos de las diferentes actividades como consumo de energía, recursos y residuos, y se aplican factores de emisión para convertir estos datos en CO₂eq. Los factores de emisión, son coeficientes que permiten estimar la cantidad de gases emitidos o absorbidos por unidad de actividad, según estándares internacionales (IPCC, 2019). Estos factores, basados en bases de datos o directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, representan valores promedio que reflejan las emisiones asociadas a un nivel de actividad bajo condiciones operativas específicas.

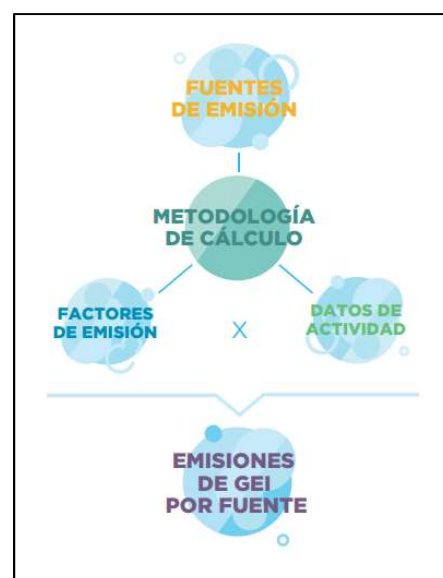


Figura 3: Metodología de cálculo. Fuente: Inventario de Gases de Efecto Invernadero (2017)

En los sistemas de granos, permite cuantificar las emisiones derivadas de **prácticas** como el uso de fertilizantes, la operación de maquinaria agrícola y la gestión de residuos. Este indicador no solo identifica las principales fuentes de emisión, sino que también proporciona una base para implementar estrategias que optimicen los recursos y reduzcan el impacto ambiental.

Además, en el contexto actual, la huella de carbono se convierte en una herramienta fundamental para que los productores participen en mercados internacionales que exigen trazabilidad y certificaciones de sostenibilidad.

Factores que Contribuyen a la Huella de Carbono en Sistemas de Granos

En los sistemas de granos, los principales factores que contribuyen a la huella de carbono incluyen:

Fertilización: La aplicación de fertilizantes sintéticos, en particular aquellos que contienen nitrógeno, genera emisiones de óxidos de nitrógeno (N_2O), un gas con un potencial de calentamiento global mucho mayor que el CO_2 .

Uso de maquinaria agrícola: La energía consumida por tractores, sembradoras, cosechadoras y otros equipos representa una fuente importante de emisiones de CO_2 , especialmente cuando estos equipos funcionan con combustibles fósiles.

Manejo del suelo y de residuos: El manejo de residuos orgánicos y la labranza del suelo pueden liberar carbono almacenado en el suelo, además de contribuir a la liberación de metano o de óxidos de nitrógeno.

Metodología de Evaluación

Selección de los Establecimientos

Los establecimientos analizados en este informe fueron seleccionados en base a criterios de tipo de producción (rotación de tercios, rotación intensificada), fertilización, labranza, localización, entre otros.

Los establecimientos seleccionados para la estimación de huella de carbono en los casos de se ubican en región Pampeana, principalmente en el norte y oeste de Buenos Aires, y sur de Santa Fe.

Se incluyeron productores modales y de vanguardia, con el objetivo de obtener una muestra variada que permita observar diferencias en las emisiones de carbono asociadas a distintos tipos de prácticas agrícolas.



Figura 4: Zonas donde se ubican los establecimientos

Datos Recolectados

Para la medición de la huella de carbono, se recopilaron datos sobre las siguientes variables:

- Localización
- Cultivo
- Antecesor
- Fecha de siembra
- Rendimiento
- Densidad de siembra
- Superficie cosechada
- Aplicaciones de fertilizantes
- Aplicaciones químicas
- Fecha de cosecha
- Manejo de residuos
- Prácticas de cultivo y rotación de cultivos

Herramienta Utilizada

Para el cálculo de la huella de carbono en cada uno de los establecimientos, se utilizó la **Calculadora de Huella de Carbono de CREA**, que permite conocer las emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs) de los cultivos, teniendo en cuenta la cantidad producida. Por lo tanto, muestra la eficiencia productiva de esas emisiones.

Esta herramienta se trata de una estimación de la emisión de gases de efecto invernadero (GEIs) por tonelada de producción de grano ($\text{CO}_2\text{eq/Ton}$ producto).

Para la construcción de la estimación de emisiones de GEIs se tomó como base la metodología del IPCC 2006, y su refinamiento del 2019, la cual determina la metodología de cálculo de las emisiones generadas por un país para realizar los inventarios nacionales de GEI.

Método de Cálculo

Los gases de efecto invernadero tienen asociado un potencial de calentamiento. Este potencial es expresado en la cantidad de unidades equivalentes. Tomando al CO_2 como la unidad, potencial de calentamiento igual a 1, los demás gases expresan el potencial de calentamiento como la cantidad de unidades de CO_2 equivalente es emitida por unidad de gas.

$\text{CO}_2 = 1$ $\text{CH}_4 = 21$ $\text{NO}_2 = 310$

Esta relación se utiliza unificar las unidades entre diferentes gases se determina el potencial de calentamiento en relación a la cantidad de unidades de CO_2 , se calcula la cuantía de dióxido de carbono (CO_2) que generarían los mismos efectos que la cantidad emitida de un GEI o la mezcla de algunos. Esta se llama dióxido de carbono equivalente (CO_2eq), y es en la unidad que se expresa este indicador.

El indicador tiene en cuenta el planteo técnico realizado a nivel de lote en una campaña, expresa la cantidad de CO_2eq emitido en los siguientes componentes o fuentes de emisión:

- *Residuos de Cosecha*: Incluye las emisiones de N_2O debidas al nitrógeno presente en residuos de cultivos (sobre la superficie y debajo de ésta). Este óxido nitroso genera emisiones "directas" debidas a la descomposición natural de los residuos aportados al suelo que se convierte en N_2O y emisiones "**indirectas**" dadas por la volatilización y lixiviación del NH_3 y NO_x .
- *Fertilizantes nitrogenados*: Incluye emisiones de N_2O , tanto en forma directa como indirecta, generada por el nitrógeno aplicado en forma de fertilizantes sintéticos.
- *Urea*: La urea genera emisiones de N_2O , pero además conduce a una pérdida de CO_2 que se fija en el proceso de producción industrial (la materia prima principal es el Gas Natural). La urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) se convierte en amonio (NH_4^+), ion hidroxilo (OH^-), y bicarbonato (HCO_3^-). El bicarbonato que se forma se convierte en CO_2 y agua. En este componente se suman además las emisiones por producción de los fertilizantes utilizados en el ciclo productivo.
- *Fertilizantes*: Incluye las emisiones generadas por la producción de fertilizantes empleados en el ciclo productivo.
- *Agroquímicos*: Incluye las emisiones generadas por la producción de agroquímicos empleados en el ciclo productivo.
- *Semillas*: Corresponde a la emisión generada por la producción de semillas utilizadas en la siembra.
- *Combustibles*: El cálculo de las emisiones generadas por el uso de combustibles fósiles está conformado por las emisiones debidas al consumo de nafta y gasoil utilizado en las labores realizadas durante el ciclo productivo. También este componente incluye las

emisiones que se dan en la etapa de extracción y de refinado en el proceso de producción de combustible utilizado.

Se consideró que el carbono del suelo se encontraba estabilizado, es decir sin cambios en el período de tiempo analizado (Tier 1, IPCC, 2019). Por otro lado, consideramos que el balance de carbono del suelo se debe calcular para la rotación agrícola global, no para un cultivo determinado.

El resultado final se obtiene entre la relación de las emisiones totales generadas y las toneladas de producto obtenido.

Fuente de información del cálculo

DAT - Sección Aplicaciones Químicas

Periodo de Análisis

Los datos presentados en este informe corresponden al periodo comprendido entre la campaña agrícola 2023/2024. Este lapso de tiempo permite captar las variaciones en las emisiones asociadas a diferentes etapas del ciclo agrícola.

Resultados

Resultados generales

Se analizaron en total **245 casos**: 30 casos de trigo, 116 de soja y 99 de maíz (Tabla 1), de la campaña 23-24.

El **rendimiento promedio** correspondiente a esta campaña, fue bajo para trigo (2877 kg/ha), medio para soja (3531 kg/ha) y medio a bajo para maíz (6567 kg/ha). Cabe resaltar que, al analizar un solo año, los rendimientos pueden no representar al promedio histórico, ya que puede incurrir en un desvío propio de la campaña.

Las **emisiones totales** de las gramíneas (trigo y maíz) fueron muy superiores a las de soja, y similares entre sí.

La **huella de carbono** fue superior para trigo que la de maíz, ya que tuvo similar cantidad de emisiones, pero menor rendimiento. La menor huella de carbono fue la del cultivo de soja.

Tabla 1: Caracterización general de la base de datos analizada.

	Trigo	Soja	Maíz
Cantidad de casos	30	116	99
Rendimiento (kg/ha)	2877	3531	6567
Emisiones totales (kg CO₂eq)	1650	370	1596
Huella de Carbono (kg CO₂eq/tn)	754	115	304

Emisiones totales por cultivo por hectárea

La Figura 5 representa las **emisiones totales de carbono en kilogramos de CO₂ equivalente, para tres cultivos: trigo, soja y maíz**.

El gráfico boxplot utilizado permite visualizar aparte de los valores promedio, la distribución y variabilidad, en cada cultivo, proporcionando información relevante para interpretar su impacto ambiental. En esta figura, se observa la mayor dispersión de las emisiones totales en maíz que en trigo o soja.

En el caso del **trigo**, las emisiones varían entre aproximadamente 1.000 y 2.000 kg CO₂ eq, con una dispersión moderada y la presencia de algunos valores atípicos que se encuentran por debajo de los 1.000 kg CO₂ eq. Este cultivo se ubica en un nivel intermedio de impacto total en comparación con los otros dos.

La **soja**, por su parte, muestra las emisiones totales más bajas, con valores que se ubican entre los 200 y 400 kg CO₂ eq. Su rango es estrecho, lo que refleja una baja dispersión y sugiere este cultivo tiene menores requerimientos de fertilizantes.

En contraste, el **maíz** presenta el rango más amplio de emisiones y dispersión, con valores que varían desde 900 hasta más de 3.000 kg CO₂ eq. Se observa que hay pocos valores muy altos, asociados a altos valores de nitrógeno aplicado (Figura 12).

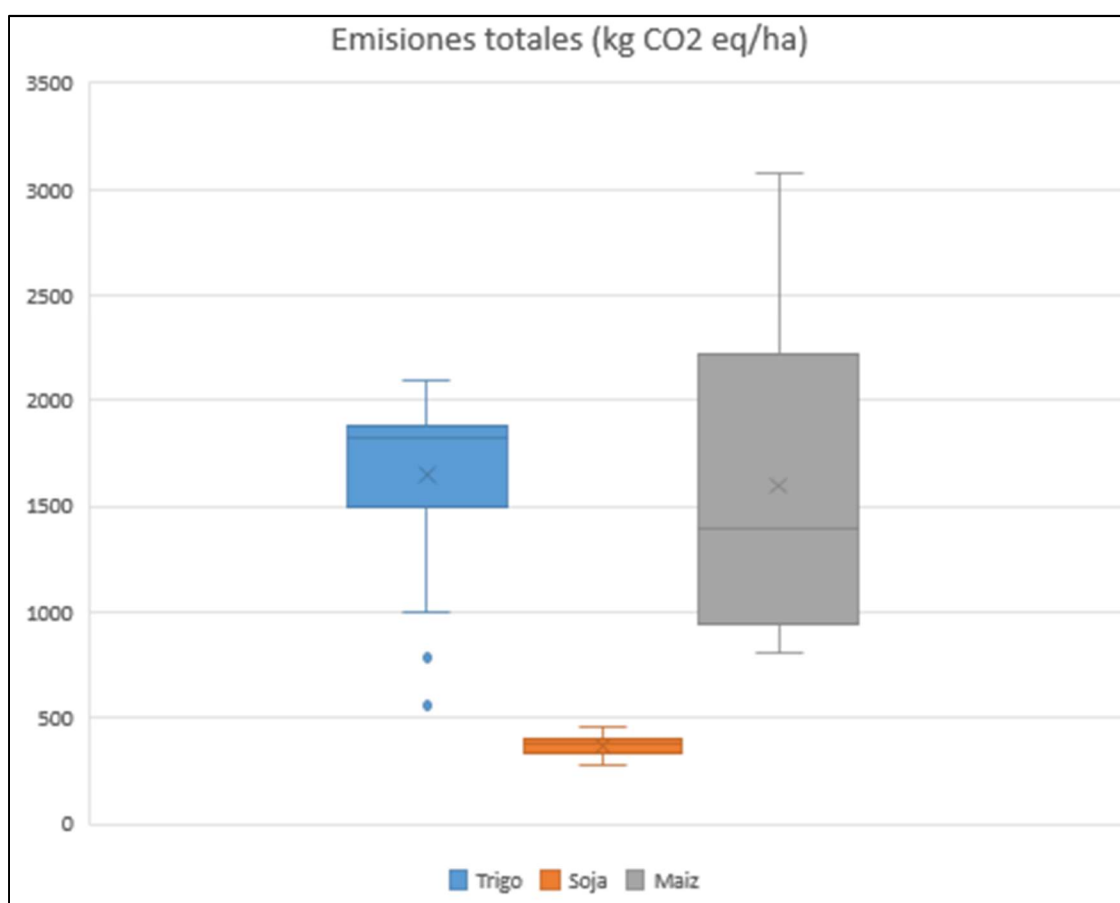


Figura 5: Emisiones totales (kg CO₂ eq/ha) según cultivo

Huella de carbono: Emisiones totales por tonelada producida

La Figura 6 ilustra la **huella de carbono, expresada en kg CO₂ eq por tonelada producida**. La huella de carbono, fue mayor en trigo, seguida por maíz y soja. Se observan valores muy altos (por fuera de la caja y bigotes), en trigo y en maíz, los cuales están asociados a rendimientos muy bajos.

En el **trigo**, la huella de carbono varía entre 200 y 700 kg CO₂ eq/tn, mostrando una eficiencia intermedia y algunos valores atípicos más altos, asociados a muy bajos rendimientos y/o altas fertilizaciones.

La **soja**, por otro lado, presenta la huella de carbono más baja, con valores cercanos a 100 kg CO₂ eq/tn, siendo el cultivo más eficiente en términos de emisiones por tonelada producida.

Por último, el **maíz** muestra la mayor dispersión de datos, con valores que oscilan entre 300 y más de 1,000 kg CO₂ eq/tn.

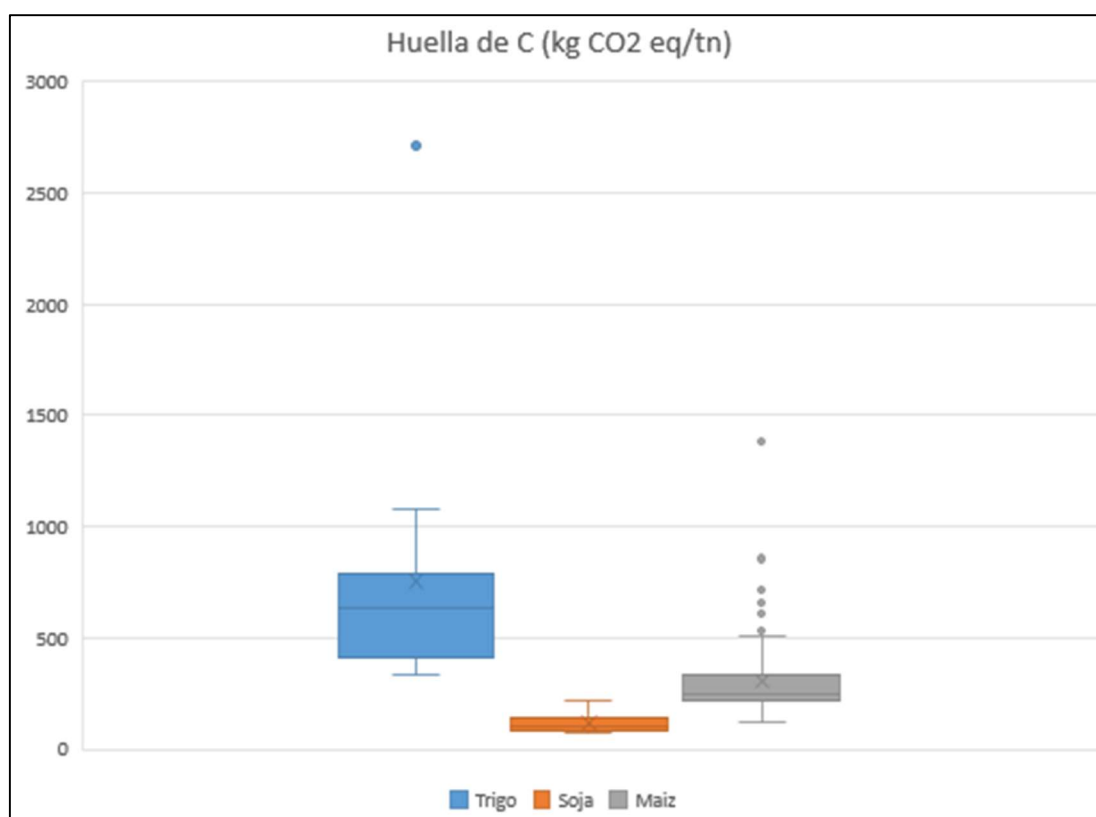


Figura 6: Huella de C (kg CO₂ eq/tn) en los cultivos de soja, maíz y trigo

Contribución de las distintas fuentes de emisiones

La Figura 7 muestra la **contribución porcentual de distintas fuentes de emisiones para cada cultivo**. Para interpretar el gráfico apilado en porcentaje, es importante observar cómo cada segmento apilado representa la proporción relativa de una fuente de emisiones en el total para cada cultivo. La altura total de cada barra siempre equivale al 100%, y los colores distintivos de los segmentos indican las diferentes fuentes de emisión. Esto permite comparar no solo la composición interna de las emisiones para un mismo cultivo, sino también las diferencias en la contribución relativa de las fuentes entre cultivos. Además, es útil prestar atención al orden de los segmentos para identificar rápidamente cuáles tienen un impacto mayor o menor dentro de cada barra y entre ellas.

En el caso del **trigo**, aproximadamente el 80% de las emisiones provienen de los fertilizantes (44% uso de fertilizantes nitrogenado, 36% producción de fertilizantes), mientras que otras fuentes como residuos de cosecha, semillas y agroquímicos tienen una contribución mucho menor en comparación, siendo el segundo en importancia los residuos de cosecha.

En la **soja**, la principal fuente de emisiones proviene principalmente de los residuos de cosecha. En este cultivo, también se observa una proporción significativa de emisiones provenientes del uso de combustible y de la producción de semillas y agroquímicos, y en menor medida el uso de fertilizantes, lo que refleja una mayor diversidad en las fuentes de impacto.

Finalmente, en el cultivo de **maíz**, las emisiones de fertilizantes, tanto por producción como por uso de los mismos, también son predominantes, aunque con una contribución relativa algo menor que en el trigo, mientras que los residuos de cosecha y otras fuentes ocupan un lugar menos relevante.

En **trigo y maíz**, las emisiones por uso y producción de fertilizantes son las de mayor participación porcentual en el total de emisiones (más del 70% en ambos casos), mientras que en soja las emisiones se reparten más equitativamente, siendo los residuos de cosecha la fuente más importante de GEI (Figura 7).

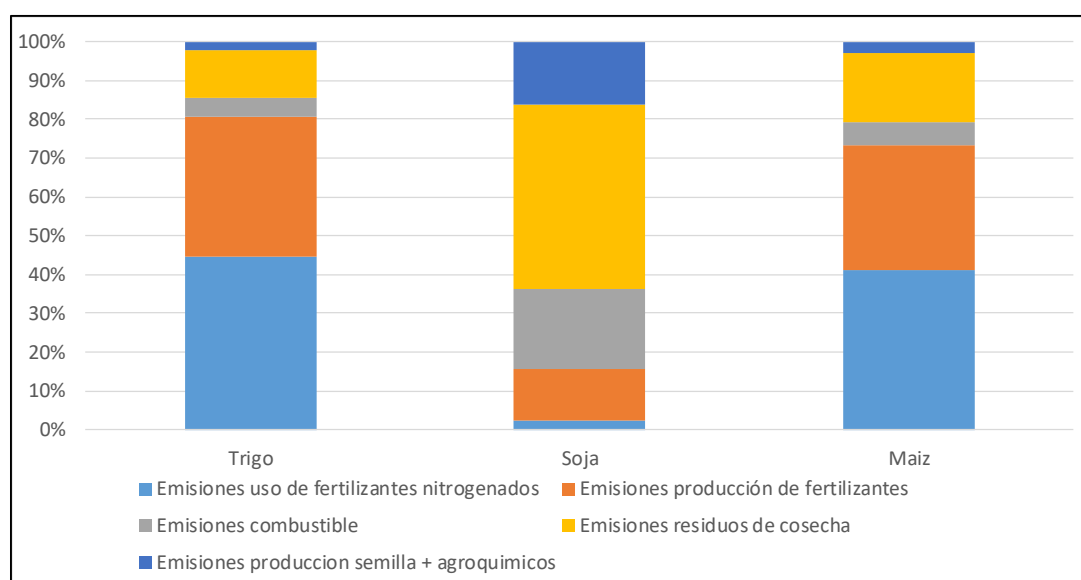


Figura 7: Aporte porcentual de cada fuente de emisiones de GEI, por cada cultivo.

Trigo

Las **emisiones totales** en trigo se correlacionaron estrechamente ($R^2 = 0,9399$) con la **cantidad de nitrógeno** aplicado (Figura 8). Por cada kg de nitrógeno aplicado las emisiones totales aumentaron 16.6 kg. Sin embargo, la **huella de carbono** no estuvo asociada significativamente al nitrógeno aplicado (Figura 9). A pesar de que las emisiones aumentan con el nitrógeno aplicado (Figura 8), el rendimiento también aumentó, y por lo tanto la huella de carbono se mantuvo estable en el rango analizado.

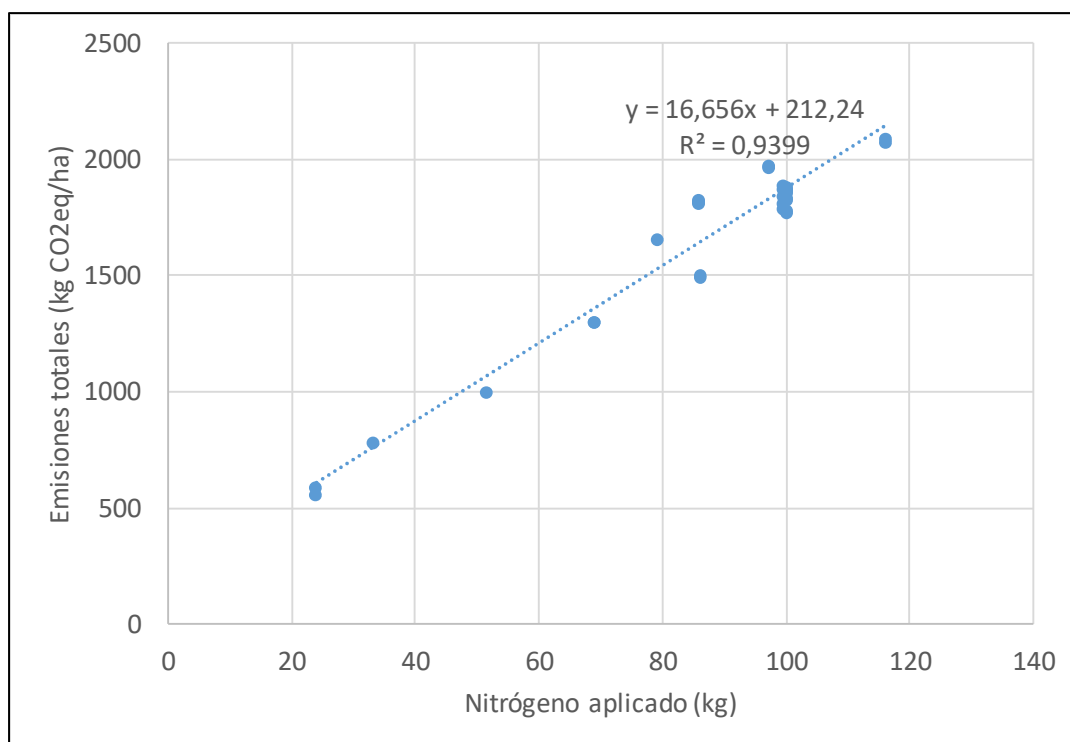


Figura 8: Emisiones totales de GEI en función del nitrógeno aplicado en trigo.

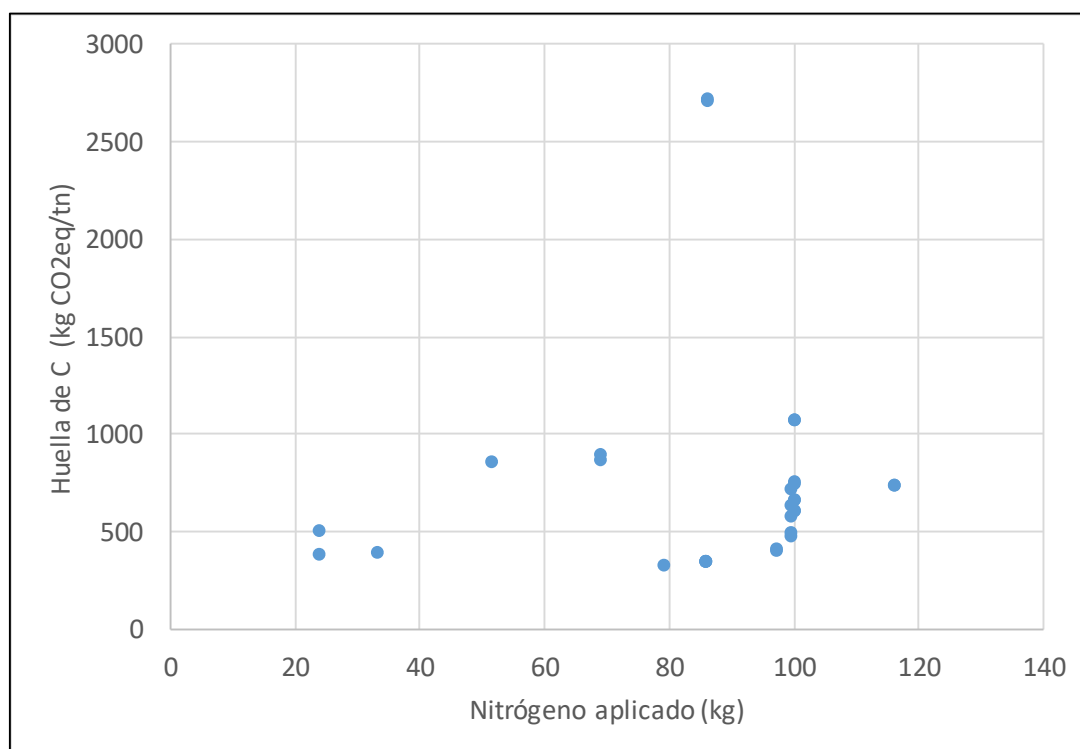


Figura 9: Huella de carbono en función del nitrógeno aplicado en trigo.

Se observó una asociación negativa entre **huella de carbono y rendimiento** en trigo (Figura 10), con un ajuste moderado a un modelo exponencial ($R^2 = 0,6852$). Esto implica que las emisiones no aumentaron, o aumentaron menos que proporcionalmente al aumentar el rendimiento.

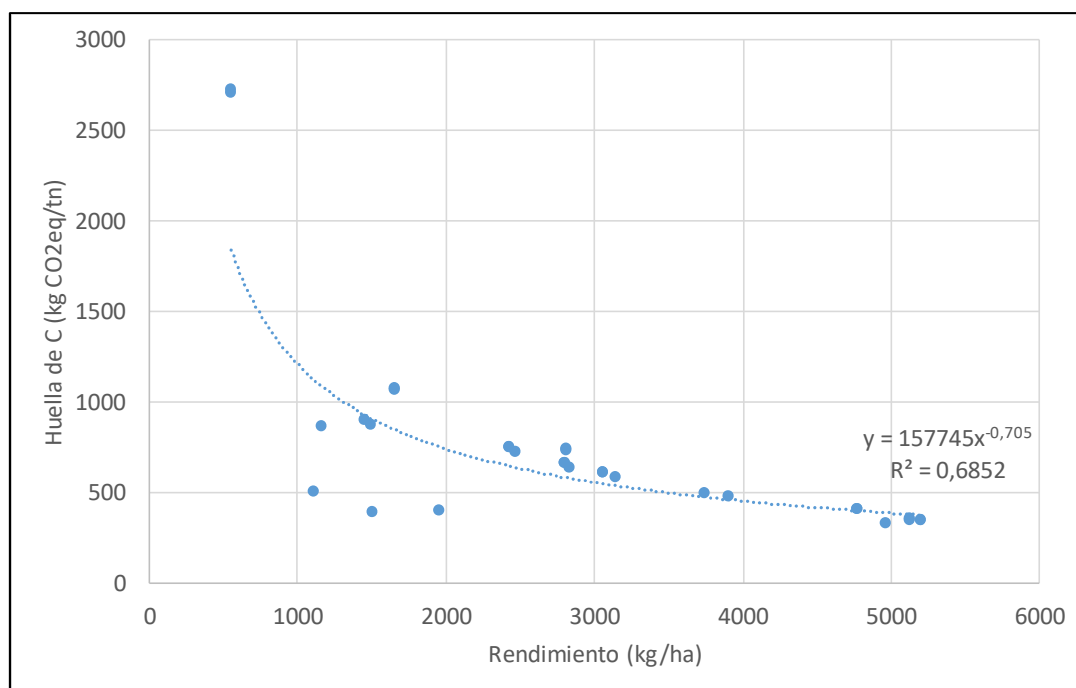


Figura 10: Huella de carbono en función del rendimiento en trigo.

Soja

En el caso de la soja, la asociación negativa entre **huella de carbono y rendimiento** fue aún más estrecha (Figura 11). El ajuste exponencial presentó un coeficiente de determinación muy alto ($R^2 = 0,9225$), lo que evidencia que el aumento en el rendimiento tiene un impacto claro en la reducción de las emisiones por unidad de producto.

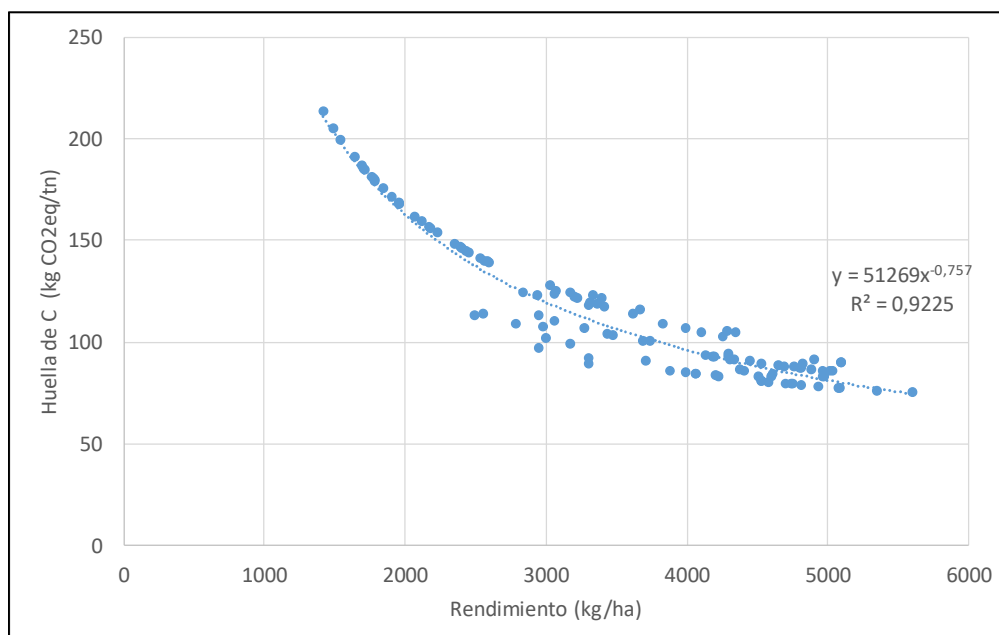


Figura 11: Huella de carbono en función del rendimiento en soja.

Maíz

Las **emisiones totales** estuvieron fuertemente relacionadas con el nitrógeno aplicado, con un $R^2 = 0,9404$ (Figura 12). Por cada kilogramo de nitrógeno aplicado, las emisiones aumentaron en 17,8 kg de CO₂eq, lo que pone de manifiesto la importancia de la fertilización nitrogenada en las emisiones de GEI en maíz.

De manera similar al trigo, la **huella de carbono** no se relacionó con la cantidad de nitrógeno aplicado (Figura 13).

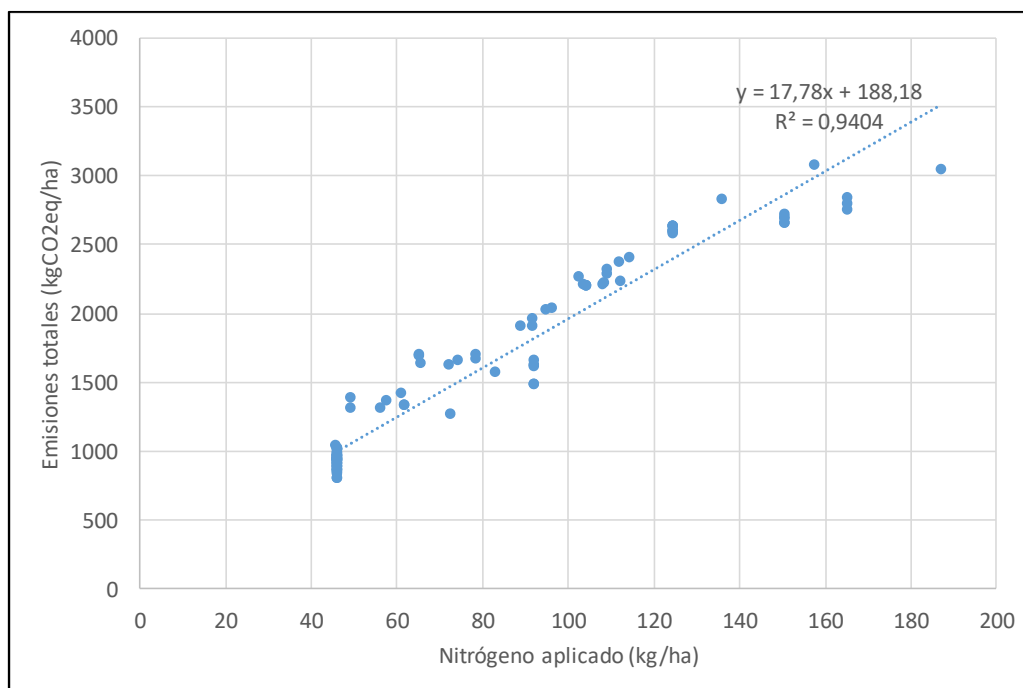


Figura 12: Emisiones totales de GEI en función del nitrógeno aplicado en maíz.

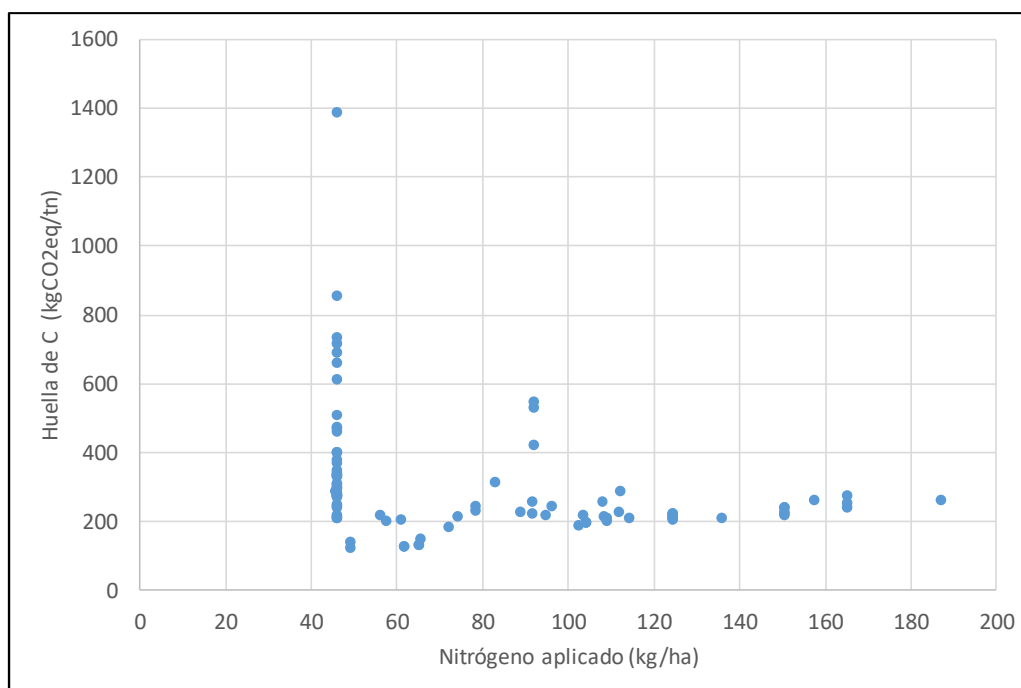


Figura 13: Huella de carbono en función del nitrógeno aplicado en maíz.

La relación entre **huella de carbono** y **rendimiento** del maíz, presentó un comportamiento diferenciado (Figura 14). Con valores de rendimiento mayores a 6000 kg/ha, se evidencia una falta de relación entre la huella de carbono y los rendimientos. Con rendimientos inferiores a 6000 kg/ha, la huella de carbono aumenta exponencialmente, ya que las emisiones de GEI no disminuyeron proporcionalmente. En estos casos de bajos rendimientos, seguramente afectados por adversidades bióticas o abióticas, es importante tratar de adecuar el paquete tecnológico, sobre todo fertilización, para disminuir de esta manera la huella de carbono.

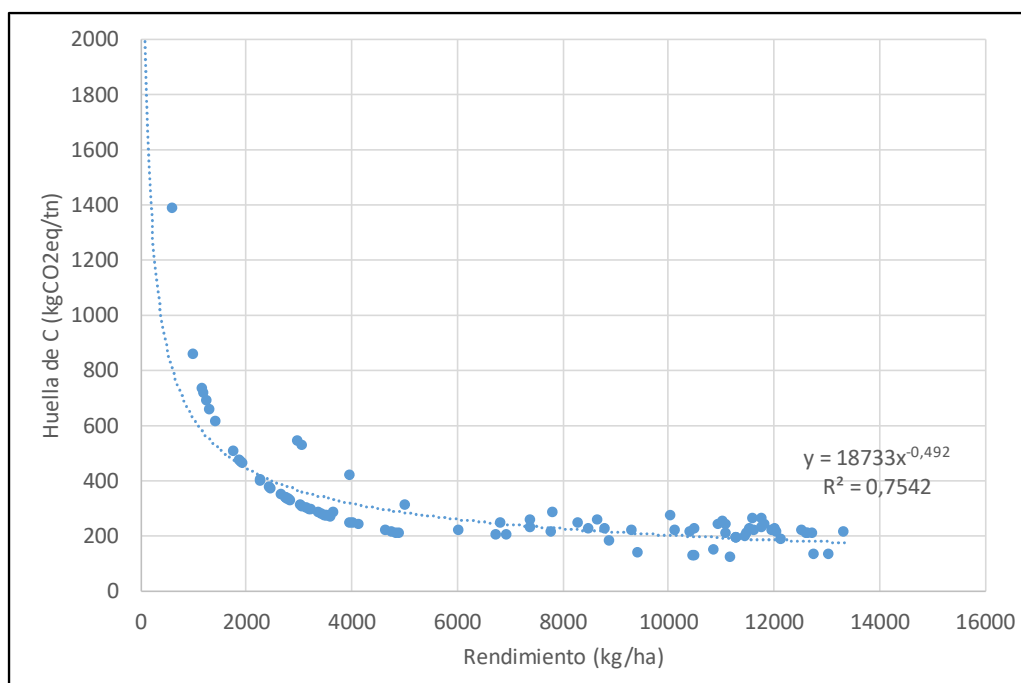


Figura 14: Huella de carbono en función del rendimiento en maíz.

Discusión y conclusión

Se analizaron distintas situaciones, representativas de gran parte de la región productora de granos en la Argentina, durante la campaña agrícola 2023-2024.

Las **emisiones totales de las gramíneas** (trigo: 1650 y maíz: 1596 kg CO₂eq/ha) fueron muy superiores a las de **soja** (370 kg CO₂eq/ha), y similares entre sí.

La **huella de carbono** fue superior para trigo (754 kg CO₂eq/tn) que la de maíz (304 kg CO₂eq/tn), ya que tuvo similar cantidad de emisiones, pero menor rendimiento. La menor huella de carbono fue la del cultivo de soja (115 kg CO₂eq/tn).

Se observó un desacople entre producción y emisiones de GEI, ya que no se vio una relación entre rendimiento y emisiones, y se evidenció una relación negativa entre rendimiento y huella de carbono, sobre todo con valores bajos de rendimiento.

En este sentido, para disminuir la huella de carbono, es necesario disminuir la brecha entre el rendimiento alcanzable y el obtenido. Prácticas como fecha de siembra, densidad lograda, correcta elección del cultivar en sintonía con el ambiente seleccionado, y la protección contra adversidades son fundamentales para aumentar el rendimiento, de manera más que proporcional que las emisiones de GEI, disminuyendo de esta manera la huella de carbono. Adicionalmente es necesario dimensionar el paquete de insumos y labores, y por lo tanto las emisiones, para el rendimiento esperado, y de esta manera disminuir sobre todo los valores muy altos de huella de carbono que se dan en lotes con bajos rendimientos.

Cabe resaltar la importancia de la fertilización nitrogenada en gramíneas, ya que representan una parte muy importante de las emisiones totales. Se evidencia entonces la importancia de trabajar en la eficiencia en el uso del nitrógeno, con prácticas tendientes a mejorar la relación entre nitrógeno aplicado, rendimiento y emisiones de GEIs.

A modo de conclusión, este informe pone en manifiesto la importancia de trabajar en estrategias de manejo, especialmente en el uso de fertilizantes nitrogenados en gramíneas, que representan una porción considerable de las emisiones totales. Los resultados obtenidos no solo proporcionan una base de datos para evaluar y comparar el impacto ambiental de diferentes sistemas, sino que también constituyen un punto de partida para la discusión de mejoras en los sistemas agropecuarios, particularmente en este caso de granos, fomentando prácticas sostenibles que respondan a las demandas de mercados internacionales y contribuyan a mitigar el cambio climático.