



ANÁLISIS

SOBRE EFICIENCIA DEL USO DEL NITRÓGENO COMO PARTE DE LA AGRICULTURA BAJA EN CARBONO

Solidaridad



ANÁLISIS SOBRE EFICIENCIA DEL USO DEL NITRÓGENO COMO PARTE DE LA AGRICULTURA BAJA EN CARBONO

Autor: Alveiro Salamanca Jimenez

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Colombia). MS y PhD en Suelos y Biogeoquímica (Universidad de California, Davis). Más de 20 años de experiencia en investigación en suelos y fertilización de cultivos, diseño de experimentos, nutrición balanceada, desarrollo, validación y adopción de nuevos productos. Experto en interpretación de análisis de suelos y recomendación de fertilizantes. Asesor en cultivos de café, palma, banano, arroz, papa, cacao y piña, entre otros.

<https://orcid.org/0000-0002-6400-0283>

<https://scholar.google.com/citations?user=WZuF2h8AAAAJ&hl=es>

Producto construido por Solidaridad en el marco del Acuerdo Café Bosque & Clima.

2023

Solidaridad

INTRODUCCIÓN

Dentro de la agenda de análisis del Acuerdo Café, Bosque y Clima, se propone fomentar la caficultura baja en carbono o la reducción de la huella de gases de efecto invernadero, entre varias líneas acción a través de una comprensión profunda de la fertilización como parte del manejo agronómico en la producción de café y su impacto ambiental. Con respecto a la economía de la producción de café, Solidaridad y sus aliados han estado consolidando información económica de fincas desde el 2011. Los datos evidencian una clara tendencia hacia un incremento en la proporción de los costos de la fertilización en la producción de café. En 2022, la fertilización representó entre el 26 y el 34 % del costo de producción. Estas cifras señalan un costo alto que podría ser menor.

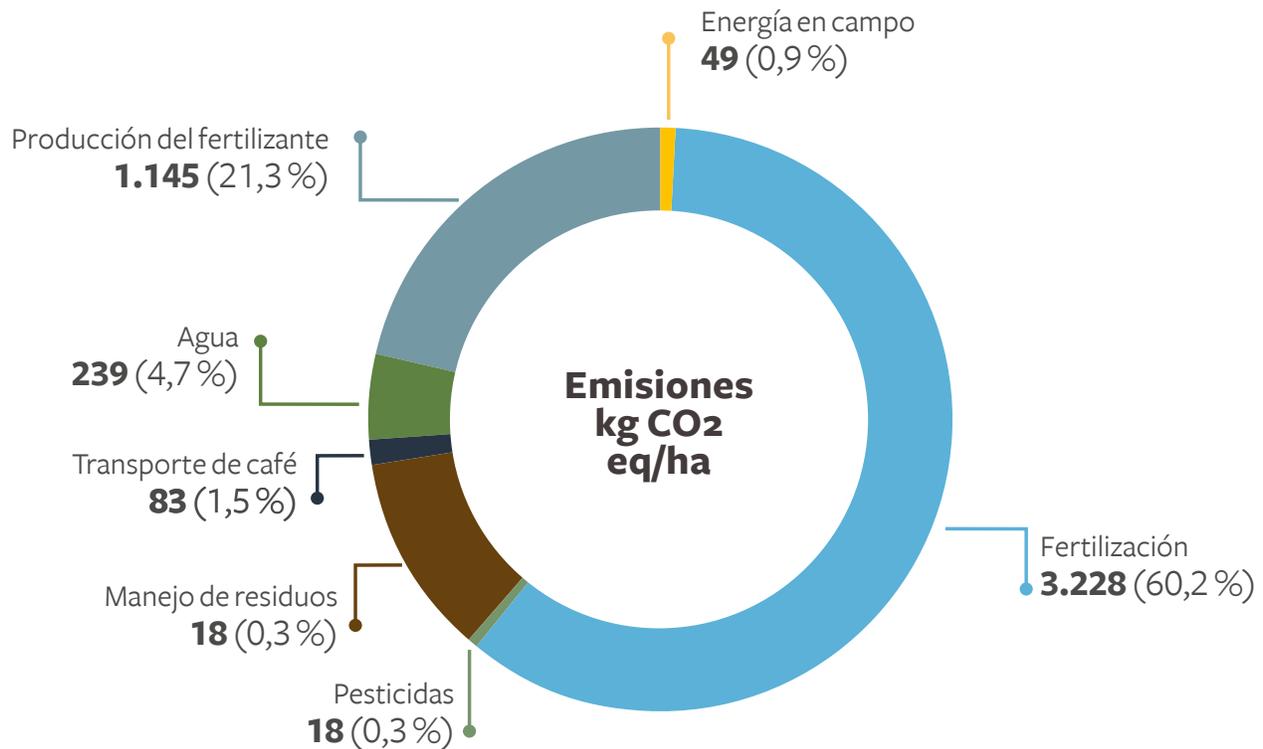
Por otra parte, al analizar la cantidad de insumos, encontramos que en promedio se utilizan 995 kilos de fertilizante por hectárea al año. La cantidad estimada a nivel nacional indica que la aplicación de fertilizantes, fuera de este grupo de análisis, es considerablemente menor. A pesar de que la fertilización es un factor que determina la productividad, su aplicación no sigue las recomendaciones técnicas que garantizan un rendimiento óptimo. La baja eficiencia de esta labor afecta tanto el manejo del cultivo como los ingresos de las familias caficultoras (Solidaridad Network, 2023).

Desde el trabajo del Acuerdo Café, Bosque y Clima, presentamos esta revisión técnica sobre un tema actual, abordando las rutas de acción para disminuir la huella de gases de efecto invernadero en la producción de café. El CO₂ no es el único gas de efecto invernadero a considerar; recordemos que las huellas de carbono, expresadas en unidades de kg CO₂/kg café, incluye la equivalencia del óxido nitroso y el metano a partir de su potencial de calentamiento global.

En la consolidación de evaluaciones sobre la huella de gases de efecto invernadero efectuadas por algunos de los aliados del Acuerdo, tomando en cuenta la información de 506 fincas y usando el modelo Cool Farm Tool, observamos que la huella de la producción de los fertilizantes aporta el 21,3 %, mientras que su empleo representa el 60,2 %. Esto implica que la fertilización constituye más del 80 % de las emisiones (Figura 1).

En la combinación de los elementos de la fertilización, el nitrógeno es el mayor componente de estas emisiones. Esto se debe a la huella asociada a la demanda de energía en los procesos industriales utilizados en su síntesis, transporte y posterior volatilización en la reacción en el suelo. Una mirada a los números indica que tenemos una huella de nitrógeno mayor que la misma huella de carbono (Solidaridad Network, 2022).

FIGURA 1. Balance de carbono en cultivo de café



Fuente: Solidaridad Network Colombia. (2022). Acuerdo Café, Bosques & Clima. Recursos. Dashboard Huella de Carbono. <https://acuerdo-cafe-bosques-y-clima.com/recursos/>.

La fertilización, y en especial el uso del nitrógeno, constituyen la hoja de ruta para la gestión de la huella de gases de efecto invernadero. ¿Cómo lograrlo con responsabilidad frente a la producción y los ingresos de los caficultores?

Este documento quiere abrir la discusión desde una perspectiva técnica. No podemos evitar las fórmulas y nombres químicos para abordar un problema relacionado con un sistema vivo: el suelo. Se requiere avanzar hacia una nueva medida de productividad, como el uso eficiente del nitrógeno (UEN o NUE, por su sigla en inglés, nitrogen use efficiency), un indicador poco conocido en el manejo técnico de la caficultura; para efectos de simplicidad de análisis y gestión lo podemos asociar como una relación de producto (café) y un insumo (nitrógeno). Aunque no contamos con datos únicos ni rangos ideales de esta eficiencia, podemos dar el primer paso al comprender mejor la dinámica del nitrógeno, su interacción en la acumulación de materia orgánica en el suelo y, sobre todo, al comenzar a monitorear su uso. La aplicación de conceptos como el de las 4R, para decidir la correcta dosis, la fuente, el momento y el lugar de aplicación, debe guiar todas las recomendaciones que los equipos técnicos de campo ofrezcan a los caficultores comprometidos con una caficultura viable y baja en carbono.

EL NITRÓGENO COMO PARTE DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

La concentración actual de CO₂ en la atmósfera es de 407 ppm y cada año aumenta 3 ppm, lo cual contribuye considerablemente al calentamiento global y al cambio climático (Buerkert et al. 2023). Las emisiones gaseosas de carbono provenientes del suelo corresponden principalmente al CO₂ producido por la respiración de las raíces y a la actividad de los microorganismos durante la descomposición de la materia orgánica y los residuos de plantas. No obstante, las plantas, algas y cianobacterias absorben un 15 % del CO₂ a través de la fotosíntesis para producir carbohidratos y oxígeno, por lo que un aumento en la concentración de este gas mejora la producción de biomasa en las plantas, reduce su requerimiento de agua y aumenta la eficiencia en su uso.

El carbono también se emite en forma de metano (CH₄) y diversos compuestos volátiles, como los terpenos. El CH₄ es el principal hidrocarburo en la atmósfera con una concentración de 1,92 ppm, y contribuye aproximadamente al 20 % del calentamiento global debido a que tiene un potencial 25 veces más alto que el del CO₂ en una escala de tiempo de 100 años. Las emisiones de CH₄ generalmente indican condiciones reductoras del suelo y se producen en micrositios con anaerobiosis después de fuertes precipitaciones o por la incorporación de sustratos de rápida descomposición (Buerkert et al., 2023).

En este sentido, la calidad y composición de las enmiendas orgánicas tienen un fuerte impacto en los flujos de emisiones y, a su vez, en el secuestro de carbono en los suelos. Cuanto mayor sea la cantidad de nutrientes en los residuos vegetales, mayores serán las tasas de descomposición, especialmente durante las etapas iniciales, por lo que un índice de calidad para este tipo de materiales es la relación carbono/nitrógeno (C/N). En general, las enmiendas con C/N menor de 15 se mineralizan más rápido que aquellas con una relación C/N más alta, liberando no solo nitrógeno inorgánico disponible para las plantas, sino también más CO₂ y N₂O a la atmósfera. Cuando la relación C/N es mayor a 25, también ocurre la inmovilización de nitrógeno por parte de la biomasa microbiana y se reduce la degradación de los materiales celulósicos (Havlin et al., 2013).

Las emisiones gaseosas de nitrógeno en los ecosistemas agrícolas también son de gran importancia, ya que el nitrógeno es emitido en forma de N₂, en forma de óxidos de nitrógeno, principalmente N₂O, o como NH₃ en suelos alcalinos. El N₂O es el tercer gas de efecto invernadero más importante y también una de las moléculas que más degrada la capa de ozono, con un potencial de calentamiento global 300 veces mayor que el del CO₂ (Buerkert et al., 2023). El N₂O se libera principalmente a través de la desnitrificación o reducción del ion NO₃⁻ en condiciones anaeróbicas, en las cuales los microorganismos usan el O₂ y dan lugar a formas gaseosas del nitrógeno que retornan a la atmósfera.

A pesar de que parte de las emisiones de N_2O se asocian con el uso de fertilizantes nitrogenados en la agricultura, también está claro que este elemento es imprescindible para la mayoría de los cultivos en la actualidad. Por ejemplo, en el caso del café, Sadeghian (2022) reporta que, al dejar de aplicar este elemento dentro de los planes de nutrición, la producción se reduce más del 45 % en cuatro años, y que este impacto es mayor en sistemas de cultivo a plena exposición solar que en sistemas agroforestales o bajo sombra.

No obstante, dicha dependencia del nitrógeno y de otros nutrientes para lograr altos rendimientos en los cultivos modernos está asociada con los procesos de mejoramiento genético desarrollados en las últimas décadas, en los cuales la selección de genotipos se llevó a cabo en condiciones de fertilización no limitantes. Aunque los fitomejoradores se enfocaron más en aumentar el rendimiento y la calidad de las cosechas con altas cantidades de fertilizantes y productos químicos, hallazgos recientes respecto a la eficiencia en el uso de nutrientes entre diversos genotipos han empezado a cambiar el enfoque del mejoramiento y a dar más relevancia a la absorción máxima y al almacenamiento de nutrientes en las plantas durante los períodos de mayor suministro, con el fin de reducir las pérdidas de estos en el suelo.

2.

FUENTES DE NITRÓGENO PARA LA FERTILIZACIÓN DEL CAFÉ

Existen dos tipos de fuentes de nitrógeno: las de síntesis química y las fuentes orgánicas.

Dentro de los fertilizantes de síntesis, la urea es la principal fuente de nitrógeno a nivel mundial por su alta concentración (45-46 %). Esto permite ahorrar en transporte y almacenamiento, así como una mayor eficiencia en la fertilización debido al menor volumen aplicado.

Le sigue en orden de importancia el sulfato de amonio con un 21 % de nitrógeno y un 24 % de azufre. A pesar de que su uso produce una reacción ácida que reduce el pH del suelo y de que su precio por unidad de nutriente es más elevado debido a la menor concentración de nitrógeno, presenta baja higroscopicidad, estabilidad química y buena granulometría.

El nitrato de amonio, con un contenido de nitrógeno del 33-34 %, es otra fuente ampliamente utilizada por su alta eficiencia agronómica, excepto en condiciones que favorecen la higroscopicidad y la lixiviación del nitrato. No obstante, su fabricación, almacenamiento y transporte están más restringidos debido a que también puede ser utilizado en la fabricación de explosivos.

Los fosfatos de amonio MAP y DAP, aunque son fuentes importantes de fósforo, también aportan una cantidad significativa de nitrógeno, especialmente cuando se usan en grandes cantidades durante la fase vegetativa del cultivo. Asimismo, otras fuentes de nitrato, como el nitrato de potasio y el nitrato de calcio, se utilizan especialmente en fertirriego y como fuentes alternativas de potasio y calcio para muchos cultivos.

Dado que la recuperación del nitrógeno de estos fertilizantes en los cultivos generalmente es inferior al 50 %, en los últimos años se han desarrollado, y se encuentran disponibles en el mercado, otras fuentes de nitrógeno que reducen las pérdidas causadas por volatilización, desnitrificación y lixiviación. Entre ellas se encuentran los fertilizantes estabilizados de liberación lenta y de liberación controlada, que ayudan a reducir el riesgo ambiental asociado al uso del nitrógeno y mejoran su eficiencia en la absorción o utilización por los cultivos. Estos fertilizantes contienen aditivos químicos, físicos o biológicos que ayudan a que la fuente de nitrógeno permanezca en la forma aplicada por más tiempo, evitando su transformación en formas susceptibles de pérdida, optimizando así la fertilización y garantizando una mejor nutrición de las plantas.

Los fertilizantes estabilizados son aquellos en los cuales se trata la urea con aditivos que estabilizan el nitrógeno. Un grupo de estos aditivos reduce la actividad de la enzima ureasa presente en el suelo proveniente de restos vegetales y células microbianas. La función principal de esta enzima es catalizar la hidrólisis de la urea y reducir las pérdidas por volatilización. El otro grupo de fertilizantes estabilizados contiene aditivos que inhiben las bacterias Nitrosomonas y reducen la tasa de nitrificación, conservando el nitrógeno en forma amoniacal, la cual es menos susceptible a la lixiviación.

Entre los fertilizantes de lenta liberación, destacan la urea formaldehído, isobutilaldehído y crotonaldehído, los cuales se producen en reactores especiales. Debido a sus cadenas C-N estables, estos fertilizantes liberan lentamente el nitrógeno por acción de los microorganismos, dependiendo de las condiciones de humedad y temperatura alrededor de los gránulos de urea.

Por otra parte, los fertilizantes de liberación controlada tienen una disponibilidad de nutrientes que se establece mejor en función del tipo, calidad y grosor del recubrimiento en cada gránulo. Entre los recubrimientos más comunes en el mercado se encuentran los polímeros con azufre, las resinas sintéticas y vegetales, y los compuestos orgánicos. Estos recubrimientos evitan el contacto directo de la urea con el agua, lo cual evita su rápida solubilización y regulan en forma controlada la liberación del nitrógeno desde el gránulo hasta el suelo. Lo anterior, reduce notablemente las pérdidas del nutriente en el ambiente por volatilización y lixiviación. La disponibilidad lenta y constante del nitrógeno en estos fertilizantes depende de factores como la exposición del gránulo al agua, la temperatura, los agentes químicos y los impactos mecánicos que penetran y rompen el recubrimiento. Estas características permiten lograr una mayor eficiencia del nitrógeno. Otro factor que ha contribuido al éxito de estas tecnologías es la distribución irregular de las lluvias, que se ha vuelto más frecuente en los últimos años. Una vez que se aplica el fertilizante, este queda en el suelo y libera el nitrógeno en la medida en que el cultivo lo requiere.

Entre las fuentes orgánicas se encuentran diferentes materiales clasificados según su origen (animal o vegetal) y su efecto en el suelo o en las plantas. Existen fuentes con bajos contenidos de nitrógeno y baja mineralización, como el compost y la turba, y otras que suministran nutrientes más rápidamente y contienen niveles más altos de nitrógeno disponible o rápidamente mineralizable, como los abonos verdes, estiércoles y biosólidos. Dado que su contenido de nitrógeno es relativamente bajo (<12 %) en comparación con los requerimientos específicos de ciertos cultivos en términos de dosis y momento de aplicación, se recomiendan en dosis bajas o medias para evitar el desbalance de otros nutrientes y, en la medida de lo posible, complementarlos con fuentes sintéticas convencionales.

3.

PROCESOS DEL CICLO DEL NITRÓGENO. ¿CÓMO SE PIERDE EL NITRÓGENO APLICADO A LAS PLANTAS?

Entender la biología y la química del nitrógeno en el continuo suelo-planta-atmósfera es importante para maximizar el crecimiento y la productividad de las plantas, al tiempo que se reducen los impactos de los insumos nitrogenados en el medio ambiente.

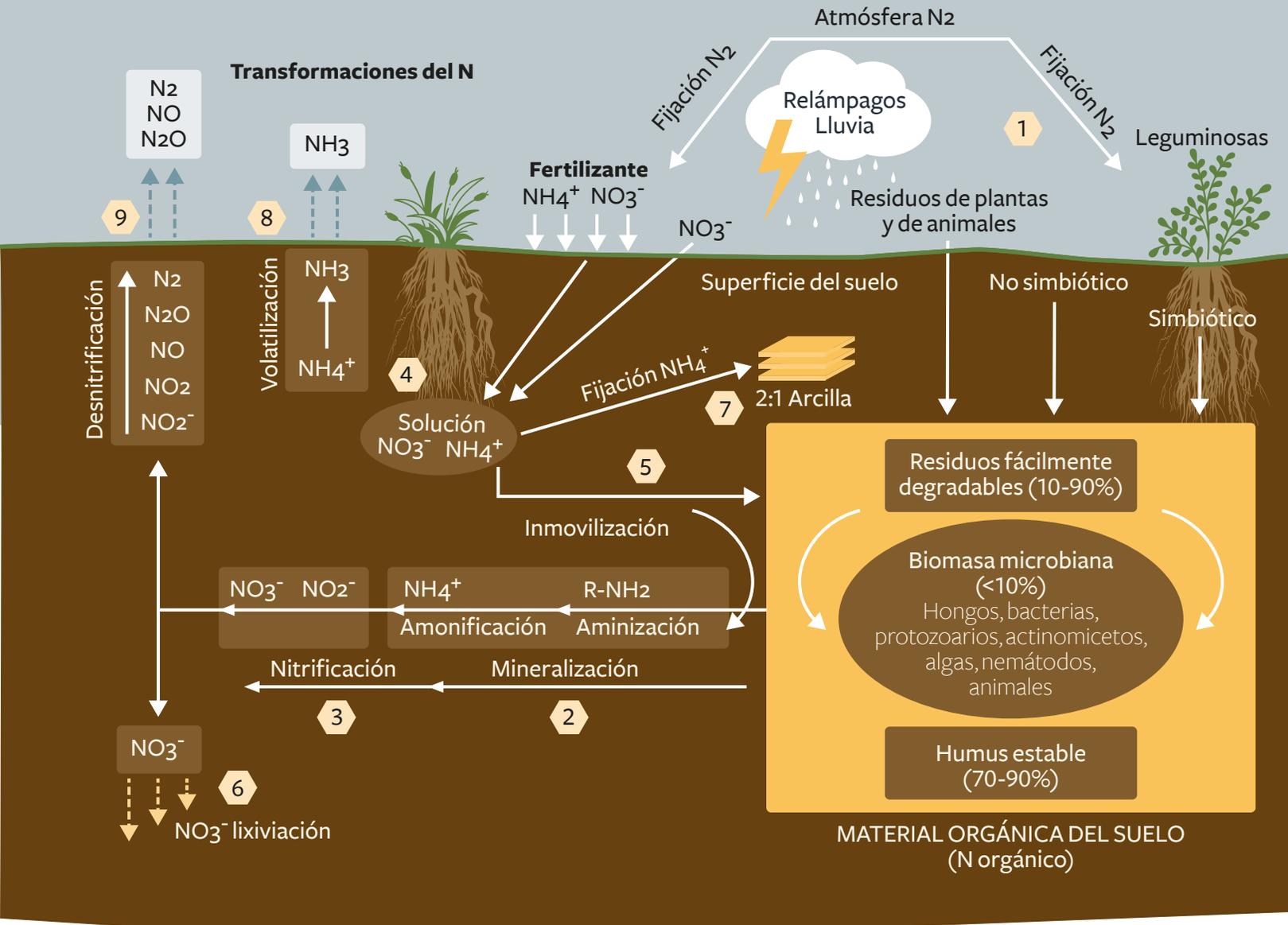
La principal fuente de todo el nitrógeno utilizado por las plantas es el N_2 , que constituye el 78 % de la atmósfera terrestre y se encuentra en equilibrio con todas las formas fijas de nitrógeno en el suelo, el agua de mar y los organismos vivos y no vivos. La mayoría de las plantas superiores no pueden metabolizar directamente este N_2 , por lo que debe convertirse en nitrógeno disponible mediante varios procesos:

- Fijación simbiótica por microorganismos asociados a las raíces de leguminosas.
- Fijación por microorganismos del suelo de vida libre o no simbióticos.
- Descargas eléctricas atmosféricas que forman óxidos de nitrógeno.
- Fabricación de fertilizantes nitrogenados sintéticos.

A partir de aquí, el ciclo del nitrógeno en el sistema suelo-planta-atmósfera implica numerosas transformaciones entre formas inorgánicas y orgánicas, y puede dividirse en entradas o ganancias, salidas o pérdidas, y ciclos dentro del suelo donde el nitrógeno no se gana ni se pierde (Figura 2). A excepción de la fijación industrial y la combustión, todas estas transformaciones de nitrógeno ocurren naturalmente. Sin embargo, los seres humanos influyen en muchos de estos procesos o manejan estas transformaciones para optimizar la disponibilidad de nitrógeno para los cultivos.

La mayoría de las transformaciones del nitrógeno son facilitadas por la biomasa microbiana a través de la fracción orgánica en el suelo. Inicialmente, se **adiciona** al suelo el nitrógeno en residuos vegetales y animales, y este elemento es **fijado (1)** desde la atmósfera mediante descargas eléctricas, leguminosas y procesos industriales. Luego, los organismos del suelo **mineralizan (2)** el nitrógeno orgánico convirtiéndolo en amonio (NH_4^+). Principalmente, las bacterias transforman el amonio en nitrato (NO_3^-) a través de la **nitrificación (3)**. Las raíces de las plantas **absorben (4)** el amonio y el nitrato presente en la solución del suelo, o bien, estos compuestos pueden ser nuevamente convertidos en nitrógeno orgánico por medio de la **inmovilización (5)**. El nitrato soluble se puede perder por **lixiviación (6)** hacia las aguas subterráneas o sistemas de drenaje debido al movimiento descendente del agua de percolación en la zona de la raíz. Por su parte, el amonio puede **fijarse (7)** por minerales de arcilla 2:1 o **volatilizarse (8)** como NH_3 gaseoso. El nitrato, derivado de la nitrificación, fertilización o lluvia, puede ser convertido por bacterias **desnitrificantes (9)** en NO , N_2O , N_2 , los cuales escapan a la atmósfera para completar el ciclo.

FIGURA 2. Transformaciones del ciclo del nitrógeno



Fuente: Havlin, et al., 2013.

En resumen, las pérdidas más frecuentes ocurren por la remoción de los cultivos, la erosión del suelo, la volatilización, la inmovilización biológica y la lixiviación. Por otro lado, las adiciones ocurren por la fijación biológica o por la aplicación de residuos tanto animales como vegetales, así como de fertilizantes.

4.

EFICIENCIA EN LA UTILIZACIÓN DE NITRÓGENO (EUN)¹ Y EJEMPLOS EN CAFÉ

La mayoría de los cultivos, entre ellos el café, requieren grandes cantidades de nitrógeno (>120 kg/ha) (Sadeghian, 2022) para alcanzar los máximos rendimientos, pero se estima que la eficiencia en el uso de este elemento es inferior al 50% (Hawkesford et al., 2023), dando lugar a pérdidas que contaminan el aire, el suelo y el agua. Además, la absorción incompleta y la baja utilización del nitrógeno derivado de los fertilizantes también se asocia con el calentamiento global debido a las emisiones de óxido nitroso.

La EUN puede tener varios significados según el contexto, pero en general se define como la relación entre la biomasa total producida (por ejemplo, el rendimiento de café) y las entradas de nitrógeno (por ejemplo, nitrógeno proveniente de los fertilizantes o nitrógeno del suelo). Además, la EUN involucra dos componentes: la eficiencia de absorción de nitrógeno (EabN: capacidad de la planta para extraer nitrógeno del suelo) y la eficiencia de utilización (EutN: capacidad de usar nitrógeno en la producción de biomasa o frutos) (Hawkesford et al., 2023).

En la investigación agronómica se utilizan varios índices para evaluar la respuesta del cultivo y la eficiencia del nitrógeno aplicado, como se muestra en la Tabla 1. En campo, estos índices se calculan comparando las diferencias en rendimiento y absorción de nitrógeno entre parcelas fertilizadas y no fertilizadas (método de diferencia) o mediante el uso de fertilizantes marcados con ¹⁵N para estimar la recuperación de nitrógeno durante uno o más ciclos de cultivo. Dado que cada índice tiene un valor de interpretación diferente, se sugiere utilizar varios índices para evaluar de manera más precisa las causas de variación en la EUN.

La medida más común de la EUN es la relación entre el rendimiento y la cantidad de nitrógeno aplicado, también llamada factor parcial de productividad (FPP). Este factor disminuye a medida que aumentan las tasas de aplicación de nitrógeno. El FPP es un índice que combina la eficiencia de absorción del nitrógeno en el suelo, la eficiencia en la absorción de fertilizantes nitrogenados y la eficiencia con la que el nitrógeno adquirido por la planta se convierte en rendimiento.

¹ NUE Nitrogen Use Efficiency, por su nombre en inglés

TABLA 1. Algunos índices utilizados en la agricultura para estimar la EUN basados en los fertilizantes nitrogenados

ÍNDICE EUN	INTERPRETACIÓN	BONDADES	LIMITACIONES
FPP: factor parcial de productividad = R_{dto}/FN	kg de producto cosechado por kg de nitrógeno aplicado.	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de usar para los productores. • Útil para comparar prácticas de manejo en un solo cultivo. • Permite estimar a niveles regionales o locales cuando hay información de entradas y salidas. 	<ul style="list-style-type: none"> • No incluye el nitrógeno nativo del suelo. • Limita las comparaciones entre sitios. • Poca importancia en suelos que no responden al nitrógeno. • Puede ser sobreestimada en suelos con exceso de aplicación de nitrógeno.
EAN: eficiencia agronómica del nitrógeno aplicado = $(R_{dto\ YN} - R_{dto\ Y0})/FN$	kg de aumento del rendimiento por kg de nitrógeno aplicado. Producto de la eficiencia de recuperación y la eficiencia fisiológica	<ul style="list-style-type: none"> • Útil para el enfoque en la producción. • Indica el beneficio relativo del fertilizante sobre el nitrógeno del suelo. • Muestra si hay acumulación o disminución temporal del nitrógeno del suelo. • Los valores mayores a 1 muestran mayor remoción, y los menores a 1 suministro de nitrógeno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los ensayos a corto plazo pueden sobreestimar la EAN porque no consideran los efectos residuales del nitrógeno del suelo o de las aplicaciones previas. • No se ajusta en ensayos sin parcelas control no fertilizadas.
ERN: eficiencia de recuperación del nitrógeno aplicado = $(AbN - Ab0)/FN \times 100$	% de nitrógeno del fertilizante absorbido por la planta.	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene en cuenta el nitrógeno del suelo. • Útil para evaluar la respuesta del cultivo al fertilizante. • En función de la sincronía entre la demanda de nitrógeno del cultivo y la cantidad de nitrógeno liberado del fertilizante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil de usar a largo plazo cuando el nitrógeno se reduce en los controles sin nitrógeno. • Se ajusta solo en ensayos con parcelas no fertilizadas. • Depende del método de aplicación y de los factores que determinan el tamaño del sumidero de nitrógeno del cultivo (genotipo, densidad, clima, estrés abiótico/biótico).

FN – cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado ($kg\ ha^{-1}$).

YN – rendimiento del cultivo con fertilizante nitrogenado ($kg\ ha^{-1}$).

Y0 – rendimiento del cultivo ($kg\ ha^{-1}$) en el tratamiento control sin nitrógeno.

AbN – absorción total de nitrógeno en la biomasa aérea a madurez ($kg\ ha^{-1}$) en el tratamiento con nitrógeno.

Ab0 – absorción total de nitrógeno en la biomasa aérea a madurez ($kg\ ha^{-1}$) en el tratamiento sin nitrógeno.

Fuente: adaptado de Congreves et al., 2021.

EJEMPLO DE ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL USO DEL NITRÓGENO (EUN)

Usaremos el índice de factor parcial de productividad (FFP) con información de una muestra de fincas de un proyecto de gestión de la huella de Gases de Efecto Invernadero, en el sur de Colombia.

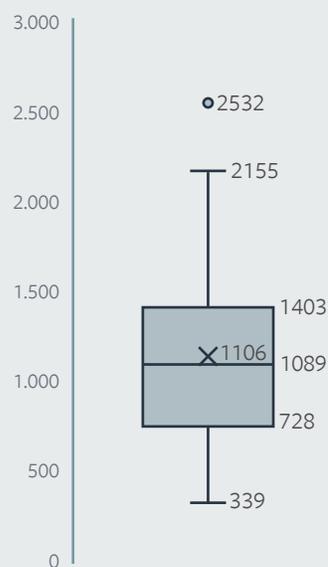
Esta es la distribución de la productividad media anual, este tipo de dispersión es muy común en campo. La productividad es la combinación de diferentes condiciones de manejo de la tecnología (variedad, edad del cultivo, densidad de siembra, fertilización, entre otras), la oferta ambiental general de las fincas y la variación por las condiciones de clima para la cosecha específica. En este caso el año de análisis corresponde a un patrón normal de lluvias. Temperatura media 18°C. Promedio de productividad 1106 kg cps/ha- año. Mediana 1089 kg cps/ha- año (rango: 339 -2532 kg cps/ha- año).

Información de contexto

Características del suelo en las fincas de la muestra (% de fincas)

Textura del suelo	Arcilloso (fino)	33%
	Arenoso (grueso)	3%
	Limoso (medio)	64%
pH del suelo (Acidez)	<= 5,5	87%
	5,5 < pH <= 7,3	13%
Drenaje del suelo	Bueno	97%
Materia orgánica del suelo	1,72 - 5,16	69%
	5,16 - 10,32	91%
	>10,32	3%

Productividad promedio (kg cps/ha- año)



El uso de nitrógeno se consolidó a partir de las diferentes fuentes aplicadas. En promedio se aplicaron 238,3 Kg de nitrógeno/ha-año). Es muy importante considerar la variación en las aplicaciones, desde valores muy inferiores como 46,4 kg/ha-año, algo similar a 2-3 bultos de fertilizante por hectárea al año, hasta 510.6 kg/ha-año. Cómo análisis de eficiencia estas aplicaciones se deben interpretar en la relación con la productividad que corresponde a cada finca.

Nitrógeno
kg- ha/año



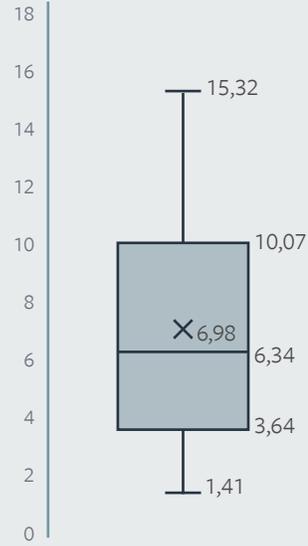
En la tabla encontramos los valores para cada finca y el indicador de EUN

USO DEL NITRÓGENO (Kg nitrógeno/ Ha)	PRODUCTIVIDAD (Kg cps/Ha-año)	EUN (Kg cps/Kg n)
46	711	15,32
124	815	6,57
137	966	7,06
138	873	6,34
145	1351	9,34
145	339	2,33
166	1894	11,38
170	1462	8,60
172	2532	14,72
204	2875	14,10
204	1400	6,86
205	2778	13,53
215	1211	5,63
216	1962	9,07
226	404	1,79

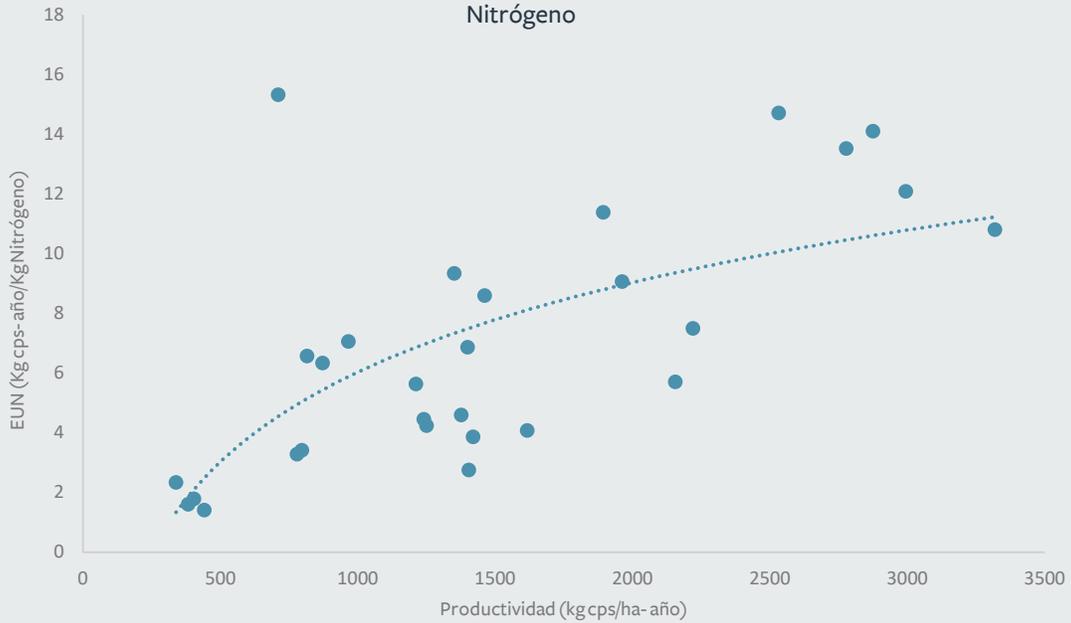
USO DEL NITRÓGENO (Kg nitrógeno/ Ha)	PRODUCTIVIDAD (Kg cps/Ha-año)	EUN (Kg cps/Kg n)
233	797	3,42
237	779	3,29
238	383	1,61
248	2995	12,08
279	1240	4,45
295	1250	4,24
296	2220	7,50
299	1377	4,60
307	3319	10,80
313	441	1,41
367	1420	3,87
377	2155	5,71
396	1616	4,08
511	1404	2,75

Esta es la distribución del indicador de EUN, vemos como está muy influenciado por la productividad. En algunos casos la aplicación en bajas dosis de nitrógeno y de baja productividad generan baja eficiencia según el indicador. Por el contrario aplicaciones que pueden ser consideradas altas, puede tener mejor eficiencia si la productividad también es alta.

EUN - Factor Parcial de Productividad (Kg cps/Kg N)



Relación entre la productividad y el Uso Eficiente del Nitrógeno



Los factores que determinan la productividad de los cultivos también influyen en la EUN y están relacionados con el cultivo, el suelo, el clima y el manejo.

En cuanto al cultivo, los programas de fitomejoramiento actuales se centran en el desarrollo de nuevos genotipos que expuestos a bajos niveles de nutrientes expresan una mayor EUN, basados en los diferentes procesos fisiológicos que afectan la absorción, translocación, asimilación y redistribución del nitrógeno. Se identifican genotipos que favorecen el crecimiento y la producción en condiciones de bajo nitrógeno (Hawkesford et al., 2023).

Dado que la mayoría de las pérdidas de nitrógeno ocurren durante los primeros meses después de la aplicación, los planes de manejo del nitrógeno y los cultivos deben ajustarse según el ciclo en el que se apliquen. Se deben combinar opciones tecnológicas definidas para aumentar la EUN, como (1) mejorar la demanda y absorción de nitrógeno (mejoras genéticas, factores que favorecen el crecimiento y la demanda de nitrógeno) y (2) opciones que influyen en la disponibilidad de nitrógeno en el suelo y los fertilizantes nitrogenados para la absorción de las plantas, como fuentes más eficientes, métodos de aplicación y manejo específico por sitio.

Dobermann (2005) afirma que al aumentar la EUN a nivel de campo, generalmente se asocia con un mayor nivel de manejo y una menor variabilidad espacial de los factores que controlan la eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y otros índices. A nivel global, al menos el 50 % del nitrógeno de fertilizante aplicado se pierde en los sistemas agrícolas. Sin embargo, también se ha demostrado que mediante enfoques de manejo específicos se pueden lograr incrementos del 30 al 50 % en la EUN. Los principales factores que han contribuido a esta mejora son:

- i) Mayores rendimientos y un crecimiento más vigoroso de los cultivos asociados con una mayor tolerancia al estrés de las nuevas variedades.
- ii) Mejor manejo de los fertilizantes nitrogenados, incluyendo dosis menores, fuentes más eficientes y mejores estrategias y métodos de aplicación (4R: dosis, fuente, momento y lugar).
- iii) Mejor manejo de los factores de producción distintos a la aplicación y manejo del nitrógeno.

Los conceptos modernos de manejo del nitrógeno, en su mayoría, se enmarcan en los conceptos de las 4R. Estos implican una combinación de decisiones antes de la siembra y durante el ciclo de cultivo. Por ejemplo, se puede lograr una mejor sincronización entre el suministro y el requerimiento de

nitrógeno mediante aplicaciones más precisas de nutrientes basadas en la demanda del cultivo y los niveles de nitrógeno mineral y orgánico del suelo. También se pueden fraccionar las dosis de nitrógeno según las etapas fenológicas o utilizar inhibidores o fertilizantes de liberación controlada.

De acuerdo con Boareto et al. (2007), la EUN en cultivos de alta productividad también puede lograrse a través del uso de buenas prácticas de manejo. En el caso de cultivos perennes de alta exigencia de nitrógeno, como el café, la recomendación se calcula según el estado nutricional de las plantas y el rendimiento esperado. Es decir, a menor contenido de nitrógeno en la hoja, se debe aplicar una mayor dosis de nitrógeno, y a mayor productividad esperada, se recomienda una mayor dosis de nitrógeno. Existe un desfase entre la liberación del nitrógeno aplicado y la absorción del elemento por el cultivo. Normalmente, la disponibilidad del nitrógeno aplicado al suelo disminuye con el tiempo mientras que la necesidad del cultivo aumenta. Por lo tanto, una fertilización aplicada en el momento correcto maximiza el efecto del nitrógeno y minimiza una posible contaminación del ambiente. Un balance adecuado de nutrientes es fundamental para obtener una mayor EUN dada la interacción mutua entre ellos. Además, el nitrógeno es absorbido principalmente por las raíces de las plantas por medio del flujo de masa, y la humedad del suelo también influye en la respuesta de un cultivo a la aplicación de nitrógeno.

En general, se menciona que el uso de coberturas muertas puede aumentar significativamente tanto la productividad como la EUN, y que una combinación adecuada con abonos orgánicos puede reducir sustancialmente los requerimientos de fertilizantes sin afectar la producción. Así mismo, las fuentes orgánicas tienen efectos beneficiosos a largo plazo sobre la fertilidad física, química y biológica del suelo.

Mejorar la EUN es una estrategia inteligente para la sostenibilidad de los sistemas cafeteros. Una combinación oportuna de las diferentes opciones tecnológicas ayudará a mitigar las emisiones de NH_3 y a mejorar los niveles de nitrógeno en el suelo. Mediante una mejor selección de las fuentes, se puede reducir el requerimiento de nitrógeno, lo cual contribuye a un manejo más racional de los fertilizantes nitrogenados a largo plazo y promueve una producción de café más sostenible.

REFERENCIAS

- Boaretto, A. E., Muraoka, T. y Trevelin, P. (2007). Uso eficiente de nitrogênio nos fertilizantes convencionais. *Informações Agronômicas* 120, 13-14. <https://acortar.link/wGZ3NF>.
- Buerkert, A., Joergensen, R. G.; Schlecht, E. (2023). Chapter 20 - Nutrient and carbon fluxes in terrestrial agroecosystems. En Z. Rengel, I. Cakmak y P. J. White (eds.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (pp. 751-774). Oxford, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00005-8>.
- Congreves, K. A., Otchere, O., Ferland, D., Farzadfar, S., Williams, S. y Arcand, M. M. (2021). Nitrogen Use Efficiency Definitions of Today and Tomorrow. *Frontiers Plant Science*, 12, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.637108>.
- Dobermann, A. R. (2005). Nitrogen Use Efficiency - State of the Art. *Agronomy & Horticulture*, 316, 1-17. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1319&context=agronomyfacpub>.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L. y Beaton, J. D. (2013). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. Upper Saddle River, Pearson Educational, Inc., 516 pp.
- Hawkesford, M. J., Cakmak, I., Coskun, D., De Kok, L. J., Lambers, H., Schjoerring, J. K. y White, P. J. (2023). Chapter 6 - Functions of macronutrients. En Z. Rengel, I. Cakmak, I y P. J. White (eds), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (pp. 201-281). Oxford, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00019-8>.
- Sadeghian, S. (2022). *Nutrición del café. Consideraciones para el manejo de la fertilidad del suelo*. Cenicafé, 228 p. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0017>.
- Solidaridad Network Colombia. (2022). *Acuerdo Café, Bosque & Clima. Recursos. Dashboard Huella de Carbono*. <https://acuerdocafebosqueyclima.com/recursos/>.
- Solidaridad Network Colombia. (2023). *Costos de producción de café 2022 Colombia*. <https://agrolearning.org/finanzas/documentos/documentacion/informeCostos2022.pdf>.



PARA AMPLIAR EL CONOCIMIENTO EN ESTE TEMA:

Bartelega, L. (2018). *Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta, controlada e blends para o cafeeiro* [disertación de maestría académica, Universidad Federal de Lavras]. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/11228>.

EU Nitrogen Expert Panel. (2016). *Nitrogen Use Efficiency (NUE) - Guidance Document for Assessing NUE at Farm Level*. Wageningen University.

Havlin, J. y Heiniger, R. (2020). Soil Fertility Management for Better Crop Production. *Agronomy*, 10(9), 1349. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091349>.

Queiroz, M. C. A. (2018). *Eficiência agronômica de fertilizantes nitrogenados formulados a partir de biocarvão e fonte mineral* [disertación de maestría, Instituto Agronômico]. <https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/pb189016.pdf>.

Sadeghian- Khalajabadi, S., Acuña-Zornosa, J. R., Salazar-Gutiérrez, L. F. y Rey-Sandoval, J. C. (2022). *Determinants of nitrogen use efficiency in coffee crops. A review*. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 39(2), 198-219. <https://doi.org/10.22267/rcia.223902.183>.

De Souza, T. L., de Oliveira, D. P., Santos, C. F., Pereira, T. H., Campos, J. P., da Silva, E. R., Fernandes, T. J., de Souza, T. R., Ramirez, V. y Guelfi, D. (2023). *Nitrogen fertilizer technologies: Opportunities to improve nutrient use efficiency towards sustainable coffee production systems*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 345, 108317. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108317>.



ANÁLISIS
SOBRE EFICIENCIA DEL USO DEL NITRÓGENO
COMO PARTE DE LA AGRICULTURA BAJA EN CARBONO

Solidaridad