



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**MEDICIÓN DE EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO EN UN
SISTEMA SILVOPASTORIL: GRAMÍNEAS-LEGUMINOSAS
ARBÓREA, PASTOREADO POR BOVINOS, EN UNA
REGIÓN DE CLIMA TROPICAL**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN
CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

PRESENTA:

TANIA GUADALUPE OSORIO MONTOR

Temascaltepec, Estado de México. Noviembre 2021



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MÉXICO**

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**MEDICIÓN DE EMISIONES DE ÓXIDO NITROSO EN UN
SISTEMA SILVOPASTORIL: GRAMÍNEAS-LEGUMINOSAS
ARBÓREA, PASTOREADO POR BOVINOS, EN UNA
REGIÓN DE CLIMA TROPICAL**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

PRESENTA:

TANIA GUADALUPE OSORIO MONTOR

DIRECTORA DE TESIS

DRA. FRANCISCA ÁVILES NOVA

CO-DIRECTOR

DR. OCTAVIO A. CASTELÁN ORTEGA

TUTOR

DR. FRANCISCO SALAZAR SPERBERG

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto del incremento del nivel de *Leucaena leucocephala* en la dieta de bovinos, sobre la emisión de N₂O debido a la concentración de urea en el parche de orina, simulando un sistema silvopastoril en la época de estiaje en el trópico seco, mediante el uso de cámaras estáticas. Se utilizaron 3 tratamientos, Tratamiento A: 20 kg urea/ha en la orina de bovinos alimentados con 100 % heno de *Cynodon* + 0 % de *Leucaena leucocephala*, Tratamiento B: 36 kg urea/ha en la orina de bovinos alimentados con 16 % de *Leucaena* + 84 % de *Cynodon* y Tratamiento C: 79 kg urea/ha en la orina de bovinos alimentados con 33 % de *Leucaena* + 67 % de *Cynodon*. La medición del flujo de emisión del N₂O se realizó durante 13 muestreos a intervalos de tiempo de 0, 10, 20 y 30 minutos. Se utilizó un diseño completamente al azar con medidas repetidas y los datos se analizaron con Statistical Analysis System (SAS) Windows 9.0. El flujo de emisión de N₂O entre tratamientos no presentó diferencia significativa (p=0.749). El flujo de emisión de N₂O en las mediciones fue diferente (p=0.0001). En los tratamientos el segundo día post aplicación de orina presentó el pico de emisión de N₂O (Tratamiento A: 17.49 µg N₂O N m⁻² hr⁻¹, Tratamiento B 23.71 µg N₂O N m⁻² hr⁻¹ y Tratamiento C 22.88 µg N₂O N m⁻² hr⁻¹). El nivel de inclusión de *Leucaena* en la dieta de los bovinos en el estiaje, no influyó en la emisión de N₂O debido a la concentración de urea en el parche de orina. No obstante, en los muestreos el mayor flujo de emisión de N₂O se relacionó con la mayor humedad del suelo y con los días de aplicación de urea a través de la simulación del parche de orina.

Palabras clave: Ganadería, Cambio Climático, N₂O, Gases de Efecto Invernadero

SUMMARY

The objective of the work was to evaluate the effect of the increase in the level of *Leucaena leucocephala* in the diet of cattle, on the emission of N₂O due to the concentration of urea in the urine patch, simulating a silvopastoral system in the dry season in the tropics. dry, through the use of static cameras. 3 treatments were used, Treatment A: 20 kg urea / ha in the urine of cattle fed 100% *Cynodon* hay + 0% *Leucaena leucocephala*, Treatment B: 36 kg urea / ha in the urine of cattle fed 16% of *Leucaena* + 84% *Cynodon* and Treatment C: 79 kg urea / ha in the urine of cattle fed 33% *Leucaena* + 67% *Cynodon*. The measurement of the emission flux of N₂O was carried out during 13 samplings at time intervals of 0, 10, 20 and 30 minutes. A completely randomized design with repeated measures was used and the data were analyzed with Statistical Analysis System (SAS) Windows 9.0. The N₂O emission flux between treatments did not show a significant difference (p = 0.749). The N₂O emission flux in the measurements was different (p = 0.0001). In the treatments the second day after urine application presented the peak of N₂O emission (Treatment A: 17.49 µg N₂O N m⁻² hr⁻¹, Treatment B 23.71 µg N₂O N m⁻² hr⁻¹ and Treatment C 22.88 µg N₂O N m⁻² hr⁻¹). The level of inclusion of *Leucaena* in the diet of bovines in the dry season did not influence the emission of N₂O due to the concentration of urea in the urine patch. However, in the samplings, the higher N₂O emission flux was related to the higher soil moisture and the days of urea application through the simulation of the urine patch.

Keywords: Livestock, Climate Change, N₂O, Greenhouse Gases

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN GENERAL	7
II. REVISIÓN DE LITERATURA	12
2.1. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero a nivel Global	12
2.2. La Ganadería: Contribución a la emisión de GEI	12
2.2.1. <i>Emisiones por especie</i>	13
2.2.2. <i>Fuentes de emisión</i>	13
2.3. Importancia de contar con factores de emisión regionales para sistemas de producción similares	14
2.3.1. <i>México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI)</i>	15
2.4. El compromiso de México ante el cambio climático	17
2.5. El Gas de Efecto Invernadero: Óxido Nitroso	18
2.5.1. <i>Ciclo del nitrógeno</i>	18
2.6. Proceso de emisión de N₂O a nivel suelo	20
2.7. Relación Carbono/Nitrógeno en el suelo	22
2.8. Emisiones de N₂O del sector agropecuario	24
2.8.1. <i>El parche de orina en los sistemas de pastoreo</i>	25
2.9. Mitigación de N₂O	26
2.9.1. <i>Los sistemas silvopastoriles y aportes a la mitigación del cambio climático</i>	27
2.9.2. <i>Inclusión de <i>Leucaena leucocephala</i> en la dieta</i>	30
2.10. Técnicas de cuantificación de gases de efecto invernadero en suelos	32
2.11. Técnicas de medición de emisiones de N₂O	32
2.11.1. <i>Cámara estática</i>	33
2.11.2. <i>Cámara estacionaria manual</i>	33
III. JUSTIFICACIÓN	36
IV. HIPÓTESIS	37
V. OBJETIVOS	38
a. General.....	38
b. Específicos.....	38
VI. MATERIAL Y MÉTODO	39
6.1. Pradera experimental	40

6.2. Cámaras estáticas	43
6.3. Desarrollo de experimento	44
6.4. Diseño experimental y análisis estadístico	49
VII. RESULTADOS	50
VIII. DISCUSIÓN.....	54
IX. CONCLUSIÓN.....	56
X. REFERENCIAS.....	57
XI. GLOSARIO	67

ÍNDICE DE FIGURAS Y CUADROS

	Pág.
Figura 1. Estimación global de emisiones por especie	10
Figura 2. Emisiones nacionales de GEI por tipo de gas de los sectores, categorías, subcategoría y fuentes del IPCC 2006, en 2015	13
Figura 3. Ciclo Biogeoquímico del Nitrógeno	16
Figura 4. Proceso de emisión de N ₂ O en el suelo	17
Figura 5. Ciclo del Carbono	19
Figura 6. Fuentes de N aplicado a los suelos	23
Figura 7. Cámara estacionaria manual	30
Figura 8. Unidad de producción “Rancho el Peñón”	35
Figura 9. Localidad El Peñón, Municipio de Temascaltepec	35
Figura 10. Pradera de <i>Cynodon plectostachyus</i>	36
Figura 11. Bovinos dobles propósito distribuidos al azar para obtención de orina	37
Figura 12. Mezcla de ingredientes para dietas	38
Figura 13. Follaje de <i>Leucaena</i>	38
Figura 14. Cámaras cilíndricas de acero inoxidable	39
Figura 15. División de la pradera en parcelas subdivididas en dos segmentos o micro parcelas.	40
Figura 16. División de pradera en micro parcelas e instalación de cámaras estáticas.	40
Figura 17. Orina colectada de cada tratamiento ofrecido	41
Figura 18. Aplicación de orina en microparcels	42

I. INTRODUCCIÓN

Los productos ganaderos son responsables de más emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que la mayoría de las otras fuentes de alimentos, estas son provocadas por la producción de alimento, la fermentación entérica, los desechos de animales y el cambio en el uso de la tierra (FAO, 2018). Los principales GEI emitidos por las actividades humanas a nivel mundial son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) (IPCC, 2013), y son aquellos gases que poseen la capacidad de absorber la radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra, contribuyendo de esta manera al calentamiento global (IPCC, 2007). Se estima que el 23 % del total de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (2007 a 2016) proviene de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2019). Las actividades relativas a AFOLU representaron alrededor del 13 % de las emisiones de CO_2 , el 44 % de las de metano (CH_4) y el 81 % de las de óxido nitroso (N_2O), que a nivel mundial representa el 23 % ($12,0 \pm 2,9 \text{ GtCO}_2$ e año) del total de emisiones netas de GEI durante 2007-2016 (IPCC, 2019). El gas de efecto invernadero óxido nitroso (N_2O) es un gas con un potencial de calentamiento global directo 290 veces mayor que la del CO_2 (Domínguez *et al.*, 2007). La contabilidad de rastreo para este gas es aproximadamente el 6% del efecto invernadero total (Gogoi y Baruah, 2011). Actualmente el N_2O es uno de los GEIs al que se le presta mayor atención, pues es uno de los principales GEIs emitidos por el sector agropecuario; en los sistemas silvopastoriles las fuentes de N provienen del uso de fertilizantes y de la aplicación del estiércol, de la fijación biológica de N por leguminosas y de las heces y orina depositadas a campo por los animales. Los rumiantes son relativamente poco eficientes en convertir el N ingerido en producto, donde la retención de N en carne, lana o leche puede variar entre 3-25% del N ingerido (Whitehead, 1995) mientras que el remanente es excretado en heces y orina (De Klein *et al.*, 2008). El N_2O se produce naturalmente en los suelos durante los procesos microbiológicos de nitrificación y denitrificación (Saggar *et al.*, 2004) especialmente de los parches de orina (Pinares-Patiño *et al.*, 2009) que pueden explicar la mayoría de las emisiones en muchos ambientes (Saggar *et al.*, 2004; De Klein *et al.*, 2008). En México en 2015 se registró la emisión de 41,134.72 Gg de CO_2 e en N_2O total, y dentro del sector agropecuario se obtuvo una emisión de 21.16

Gg de CO₂ de N₂O (SEMARNAT-INECC, 2018). Dentro de los sistemas ganaderos los elementos eje sobre los cuales deberían enfocarse las prácticas de adaptación al cambio climático son: el suelo, el agua, la utilización del recurso forrajero y la productividad animal. Si bien la bovinocultura contribuye al cambio climático y a la contaminación atmosférica, existen opciones efectivas para la mitigación (Gerber *et al.*, 2013). Los sistemas silvopastoriles (SSP) son una opción de producción pecuaria donde las leñosas perennes interactúan, bajo un sistema de manejo integral con las herbáceas (gramíneas y/o leguminosas) y animales para maximizar los beneficios económicos, sociales y ecológicos. Algunas ventajas comparativas de los SSP se relacionan con la disminución de sus aportes al Cambio Climático (incremento de los depósitos de carbono en el suelo y la vegetación), menor emisión de metano por la eficiencia en el rumen del ganado, menores pérdidas de nitrógeno hacia la atmósfera por rápido y eficiente reciclaje de excretas y nutrientes y, mejores parámetros reproductivos del hato (Murgueitio *et al.*, 2013, 2014). En relación al N₂O, es importante considerar que en proyectos forestales de remoción de GEI se ha cuestionado la inclusión de especies leguminosas argumentando que por los procesos de nitrificación/desnitrificación de N del suelo mediante su fijación biológica se incrementan las entradas de N₂ (nitrógeno molecular) en el suelo produciendo un incremento en las emisiones de N₂O a la atmósfera y, en consecuencia, un aumento de las emisiones de GEI totales (Rochette y Janzen, 2005; Salinas y Hernández, 2008). Sin embargo, aún hoy es escasa bibliografía científica disponible sobre el efecto real que tiene la utilización de gramíneas-leguminosas arbóreas en los SSP en las emisiones finales de N₂O. Para México, obtener valores de emisión de N₂O propios, es de gran importancia para gestionar mejor las emisiones del ganado y establecer prioridades para el sector, teniendo una mejor comprensión de las tendencias e identificación de cuánto contribuye el ganado a través de la orina en los SSP gramíneas-leguminosas arbóreas a las emisiones de este gas en relación con otros sectores, tanto a nivel nacional como internacional, además de desarrollar formas efectivas para reducir las emisiones y permitir que las partes interesadas en el sector ganadero monitoreen e informen sobre su huella de GEI. Por tal motivo el objetivo del trabajo fue evaluar el efecto del incremento del nivel de *Leucaena leucocephala* en la dieta de bovinos, sobre la emisión de N₂O debido a la concentración de

urea en el parche de orina, simulando un sistema silvopastoril en la época de estiaje en el trópico seco, mediante el uso de cámaras estáticas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero a nivel Global

China es el mayor emisor de gases de efecto invernadero con el 26.1% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, seguida de Estados Unidos, con el 12.67%, la Unión Europea, con el 7.52%, e India, con el 7.08%. Fuera del sector energía, las principales emisiones son de la ganadería y el estiércol (5.9%), otras industrias (4.5%) y los suelos agrícolas (4.2%). El dióxido de carbono (CO₂) representa el 74% de las emisiones de gases de efecto invernadero. La mayoría de las emisiones de CO₂ (93%) provienen del uso de combustibles fósiles, especialmente para la generación de electricidad y calor, transporte, y manufactura y consumo. El uso de suelo, el cambio de uso y la silvicultura contribuyen (3.3%) a las emisiones de CO₂ causadas por el hombre, principalmente debido a la deforestación. El metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) representan el 17.2% y el 6.3% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, respectivamente, provenientes principalmente de la agricultura, el tratamiento de residuos y la quema de gas (Mengpin, 2021).

2.2. La Ganadería: Contribución a la emisión de GEI

Se estima que la ganadería contribuye alrededor del 14.5% de la total de generación de gases de efecto invernadero (GEI) de origen humano⁵ a nivel mundial (Tierra, 2020). La mayor parte de las emisiones de la ganadería son en forma de metano (CH₄) que representa aproximadamente el 50 por ciento del total. El óxido nitroso (N₂O) y el dióxido de carbono (CO₂) representan partes casi iguales con 24 y 26 por ciento, respectivamente (FAO, 2019). La producción de ganado tiene una particular emisión, destacándose la producción con una de las mayores huellas de gases de efecto invernadero entre los productos alimenticios comunes (Clune *et al.*, 2017 citado por Lynch, 2019), no obstante, los diferentes sistemas de producción de ganado de carne presentan una variación importante en sus emisiones totales (Pierrehumbert y Eshel, 2015).

2.2.1. Emisiones por especie

De acuerdo a la FAO (2019) el ganado vacuno es el mayor emisor de GEI con alrededor de 5,0 Gigatoneladas de CO₂-eq, que representan el 62% del total de emisiones. Los cerdos, las aves de corral, los búfalos y los pequeños rumiantes cuentan con niveles de emisión menores, que representan entre el 7% y el 11% de las emisiones totales (**Fig. 1**)

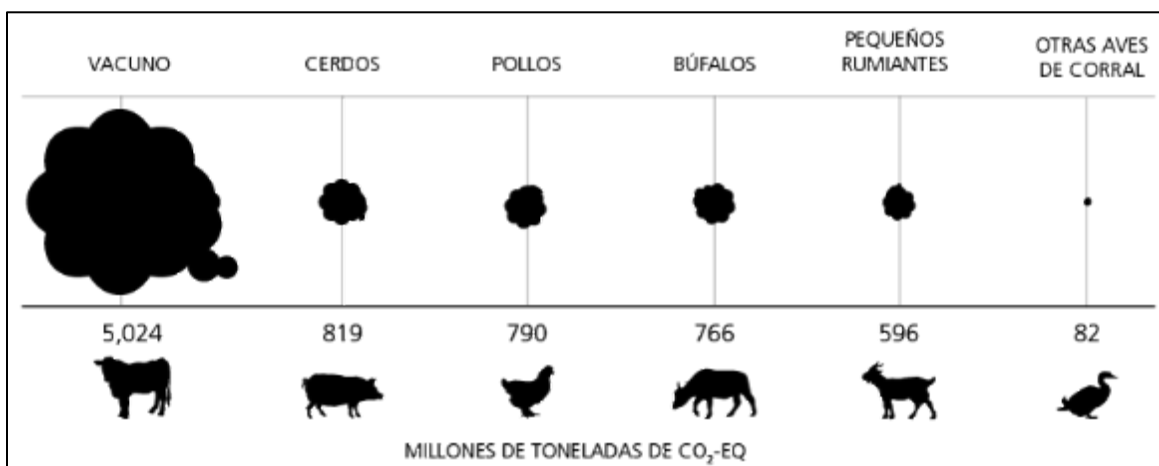


Figura 1. Estimación global de emisiones por especie (FAO, 2019).

2.2.2. Fuentes de emisión

Las fuentes de emisión del sector ganadero, tiene 4 procesos de origen, los cuales son (FAO, 2019):

a) *Fermentación entérica*

Metano: se genera durante la digestión de los rumiantes y mono gástricos (dietas con una proporción elevada de ingredientes con alto contenido en fibra se relacionan con mayores emisiones entéricas).

b) *Sistemas de gestión de estiércol*

Óxido Nitroso: producto de la descomposición del amoníaco contenido en el estiércol, los sistemas de almacenaje y tratamiento de sólidos tienden a favorecer la emisión de óxido nitroso.

c) Producción de forrajes

Emisiones de dióxido de carbono provienen de la expansión de pastizales y tierras de cultivo utilizadas para la alimentación animal en zonas naturales y bosques, de la fabricación de fertilizantes y pesticidas para dichos cultivos y de su procesado y transporte.

Uso de fertilizantes nitrogenados y la aplicación de estiércol causan emisiones de óxido nitroso

d) Consumo de energía

La fabricación de fertilizantes, el uso de maquinaria agrícola y el procesado y transporte de los cultivos para la alimentación animal generan emisiones de GEI

2.3. Importancia de contar con factores de emisión regionales para sistemas de producción similares

El Inventario de Gases de Efecto Invernadero, es una herramienta que permite contar con información detallada sobre las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, así como de sus fuentes emisoras (INECC, 2016). A través de los inventarios Nacionales de GEI (INGEI), presentados en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés), los países informan sobre sus emisiones y absorciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) provenientes de los diferentes sectores (FAO, 2015). Para gestionar mejor las emisiones del ganado y establecer prioridades para el sector, es fundamental comprender como el sector contribuye al cambio climático y como se contabilizan e informan las emisiones (FAO, 2018). Siendo importante la medición de emisiones del sector ganadero, dentro de las razones de importancia se incluyen:

- Mejor comprensión de las tendencias e identificación de cuánto contribuye el ganado a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en relación con otros sectores, tanto a nivel nacional como internacional.
- Desarrollar formas efectivas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

- Determinar si las acciones destinadas a reducir las emisiones son efectivas cuando se aplican en la práctica.
- Permitir que las partes interesadas en el sector ganadero monitoreen e informen sobre su huella de GEI.
- Facilitar la marca amigable con el clima y el acceso a los mercados para los productos pecuarios.

2.3.1. *México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI)*

Los inventarios han evolucionado en la aplicación de las metodologías del IPCC, así como en los arreglos institucionales para la obtención de datos de actividad y la aplicación de factores de emisión más acordes con las circunstancias nacionales. El inventario de México se conoce oficialmente como *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero* (INEGYCEI) (SEMARNAT-INECC, 2018). Es importante aclarar que para el IPCC la estimación de las emisiones de gases de GEI por actividad, se realiza agrupando en diferentes categorías a través del Formato Común de Reporte (CRF por sus siglas en inglés) con la finalidad de mantener un orden y uniformidad con los inventarios de otros países y hacerlos comparables. En el caso de México, esos criterios no coinciden en todo. Para clarificar la lectura de la clasificación de las fuentes de emisión, se explican a continuación los niveles de las claves del IPCC: las fuentes de emisión por categorías se codifican utilizando letras y números. El primer nivel de clasificación utiliza números correspondientes a los sectores a los sectores de un inventario. Para las categorías del sector, se usan letras mayúsculas. A las subcategorías se las identifica con números y el cuarto nivel de clasificación, denominado fuentes de emisión, usa letras en minúsculas (**Fig. 2**) (SEMARNAT-INECC, 2018).

Sector/ categoría / subcategoría/ fuente de emisión (IPCC 2006)	Gg de CO ₂ e						Emisiones
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFC	PFC	SF ₆	
[3] Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra	-147,898.94	67,156.27	34,456.10	NA	NA	NA	-46,286.57
[3A] Ganado	NA	66,131.52	4,436.08	NA	NA	NA	70,567.60
[3A1] Fermentación entérica	NA	53,442.72	NA	NA	NA	NA	53,442.72
[3A1a] Bovinos	NA	50,121.38	NA	NA	NA	NA	50,121.38
[3A1b] Búfalos	NA	NO	NA	NA	NA	NA	NO
[3A1c] Ovinos	NA	1,219.51	NA	NA	NA	NA	1,219.51
[3A1d] Caprinos	NA	1,221.50	NA	NA	NA	NA	1,221.50
[3A1e] Camellos	NA	NE	NA	NA	NA	NA	NE
[3A1f] Caballos	NA	439.92	NA	NA	NA	NA	439.92
[3A1g] Mulas y asnos	NA	110.38	NA	NA	NA	NA	110.38
[3A1h] Porcinos	NA	330.03	NA	NA	NA	NA	330.03
[3A1i] Otros (especificar)	NA	NE	NA	NA	NA	NA	NE
[3A2] Gestión de estiércol	NA	12,688.80	4,436.08	NA	NA	NA	17,124.88
[3A2a] Bovinos	NA	7,970.28	3,630.27	NA	NA	NA	11,600.55
[3A2b] Búfalos	NA	NO	NO	NA	NA	NA	NO
[3A2c] Ovinos	NA	35.80	IE3	NA	NA	NA	35.80
[3A2d] Caprinos	NA	37.83	IE3	NA	NA	NA	37.83
[3A2e] Camellos	NA	NE	NE	NA	NA	NA	NE
[3A2f] Caballos	NA	40.90	IE3	NA	NA	NA	40.90
[3A2g] Mulas y asnos	NA	10.58	IE3	NA	NA	NA	10.58
[3A2h] Porcinos	NA	4,431.18	413.46	NA	NA	NA	4,844.64
[3A2i] Aves de corral	NA	162.24	392.35	NA	NA	NA	554.59
[3A2j] Otros (especificar)	NA	NE	NE	NA	NA	NA	NE
[3B] Tierra	-148,346.07	NA	NA	NA	NA	NA	-148,346.07
[3B1] Tierras forestales	-139,970.12	NA	NA	NA	NA	NA	-139,970.12
[3B1a] Tierras forestales que permanecen como tal	-138,504.68	NA	NA	NA	NA	NA	-138,504.68
[3B1b] Tierras convertidas a tierras forestales	-1,465.44	NA	NA	NA	NA	NA	-1,465.44
[3B2] Tierras de cultivo	-876.01	NA	NA	NA	NA	NA	-876.01
[3B2a] Tierras de cultivo que permanecen como tal	-12,215.61	NA	NA	NA	NA	NA	-12,215.61
[3B2b] Tierras convertidas a tierras de cultivo	11,339.60	NA	NA	NA	NA	NA	11,339.60
[3B3] Praderas	-7,836.43	NA	NA	NA	NA	NA	-7,836.43

Figura 2. Emisiones nacionales de GEI por tipo de gas de los sectores, categorías, subcategoría y fuentes del IPCC 2006, en 2015 (SEMARNAT-INECC, 2018).

Considerando los árboles de decisión de las *Directrices del IPCC 2006* para cada fuente de emisión, se identificaron los niveles de detalle con los que se calcularon las emisiones, considerando la especificación matemática de los métodos, la información sobre los factores de emisión u otros parámetros que deben usarse al generar las estimaciones, y las fuentes de actividad para estimar el nivel general de las emisiones netas. Los niveles (*o tiers* en inglés) están definidos como:

- **Nivel 1 (T1):** Metodología por defecto del IPCC para la estimación de las emisiones y remociones de GEI. El IPCC sugiere no utilizar sólo este método.
- **Nivel 2 (T2):** Esta metodología utiliza datos específicos del país para el cálculo de las emisiones (factores propios de emisión para las circunstancias nacionales de las actividades que generan emisiones)
- **Nivel 3 (T3):** Metodología más robusta para la estimación de las emisiones, permite mediciones directas en las fuentes de emisión o el uso de modelos específicos para el país.

La estimación de la incertidumbre constituye un elemento esencial de un inventario de emisiones y absorciones de gases y compuestos de efecto invernadero. Se debe obtener tanto para el ámbito nacional como para la estimación de la tendencia, los factores de emisión, los datos de actividad y otros parámetros de estimación de cada sector (IPCC, 2006).

2.4. El compromiso de México ante el cambio climático

Las emisiones de gases de efecto invernadero de México (647 MtCO₂eq) representan el 1.42% de las emisiones a nivel mundial, y es el segundo país de Latinoamérica con una mayor contribución, sólo superado por Brasil (séptimo lugar), y sus emisiones per cápita son de 5.39 tCO₂eq. Los subsectores que más emisiones generan en México son el transporte y la generación de electricidad, con 193.2 MtCO₂eq (28%) y 156.6 MtCO₂eq (23%), respectivamente. Les siguen la agricultura (96.8 MtCO₂eq, 14%), la industria manufacturera y de la construcción (66.7 MtCO₂eq, 10%), residuos (46.8 MtCO₂eq, 7%), procesos industriales (40.5 MtCO₂eq, 6%), emisiones fugitivas (31.7 MtCO₂eq, 5%), quema de otros combustibles (26 MtCO₂eq, 4%) y edificaciones (21.6 MtCO₂eq, 3%) (Mengpin, 2021).

A pesar de la contribución relativamente baja de sus emisiones de GEI a las emisiones globales, México ha emprendido grandes retos para enfrentar este problema. Dentro del compromiso de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030 (México Gobierno de la República, 2014), México se propone mitigar el 22% de GEI,

teniendo una emisión de GEI (MtCO₂E) de 762, comparado a la línea base de 2030 de 972 (MtCO₂E).

2.5. El Gas de Efecto Invernadero: Óxido Nitroso

El óxido nitroso tiene un doble efecto en la atmósfera: es un gas de efecto invernadero y es un precursor del óxido nítrico (NO) en la estratosfera, que a su vez actúa como un detector de ozono. La obtención de inventarios globales confiables de emisiones de N₂O ha sido difícil porque solo se dispone de un número limitado de mediciones en condiciones controladas o bien conocidas (Longoria *et al.*, 2009). De acuerdo a la UNFCCC (2019), el óxido nitroso tiene un potencial de calentamiento global (PCG) de 310 (100 años) (**Cuadro I**). El PCG es definido por el IPCC (1996) como “el forzamiento radiativo acumulado de las emisiones de una masa unitaria de gas en relación con un gas de referencia (CO₂), considerando tanto los efectos directos como de los indirectos, en un horizonte de tiempo especificado”. El gas de referencia es el bióxido de carbono, por lo que las emisiones son ponderadas por el potencial de calentamiento global (PCG).

CUADRO I. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DEL GEI ÓXIDO NITROSO A TRAVÉS DEL TIEMPO.

Gas	Fórmula química	Curso de vida (años)	Potencial de calentamiento global (horizonte de tiempo)		
			20 años	100 años	500 años
Óxido nitroso	N ₂ O	120	280	310	170

2.5.1. Ciclo del nitrógeno

El ciclo global del nitrógeno está constituido por las interacciones de las distintas formas de N con el suelo, los organismos y la atmósfera. En todos los suelos, y de forma continua, existen considerables entradas y salidas de nitrógeno, acompañadas de muchas transformaciones complejas (**Fig. 3**) (Benimeli *et al.*, 2019).

La dinámica del N en el suelo está influenciada por 3 grandes procesos, los cuales son:

Ganancias de N por el suelo: Fijación biológica de N atmosférico por microorganismos, deposiciones de N de la atmosfera y aportes de N en fertilizantes sintéticos, estiércol y plantas verdes.

Transformaciones del N en el suelo:

1. Aminificación o degradación bioquímica de las proteínas y otros compuestos nitrogenados en aminoácidos y aminas.
2. Amonificación: transformación de los aminoácidos y aminas en amonio.
3. Nitrificación u oxidación bioquímica del amonio a nitrato.
4. Síntesis proteica de los microorganismos del suelo a partir de los compuestos de los procesos anteriores (inmovilización o reorganización)

Perdidas de N desde el suelo

1. Desnitrificación o reducción bioquímica de nitratos (condiciones anaeróbicas)
2. Volatilización de amoniaco
3. Lixiviación de nitratos
4. Asimilación de Nitratos por las plantas
5. Fijación de amonio por las arcillas

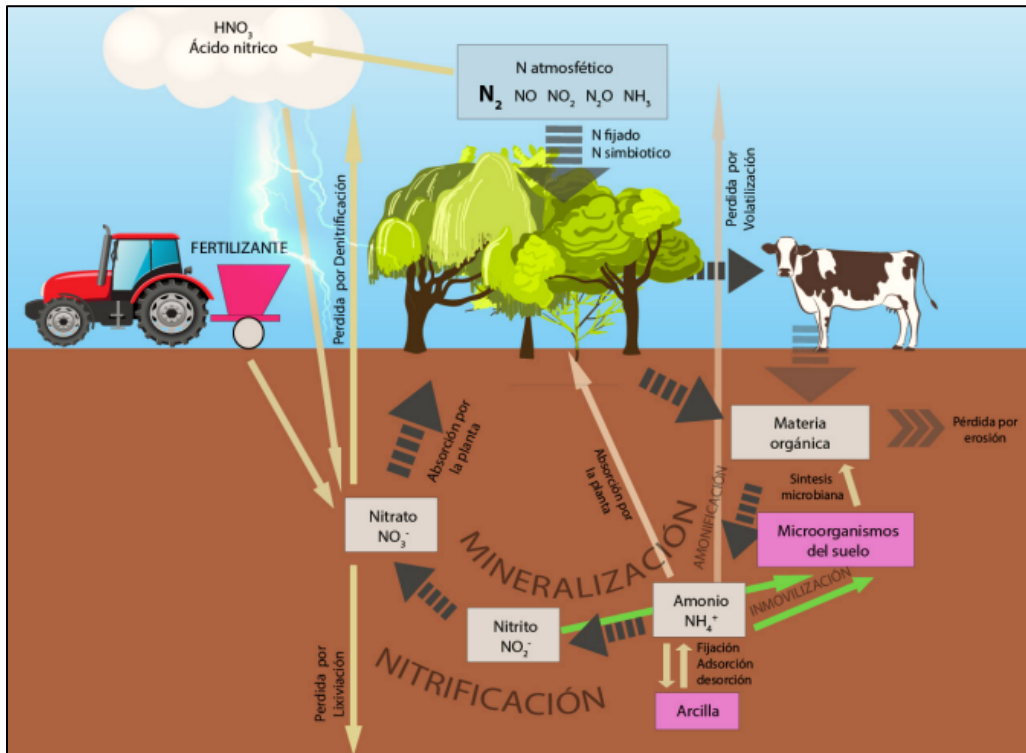


Figura 3. Ciclo Biogeoquímico del Nitrógeno (Benimeli *et al.*, 2019).

2.6. Proceso de emisión de N_2O a nivel suelo

De acuerdo a Chapin *et al.* (2002), la emisión de N_2O en el suelo se da como resultado de la actividad microbiana, en los procesos proceso de nitrificación y desnitrificación (**Fig. 4**).

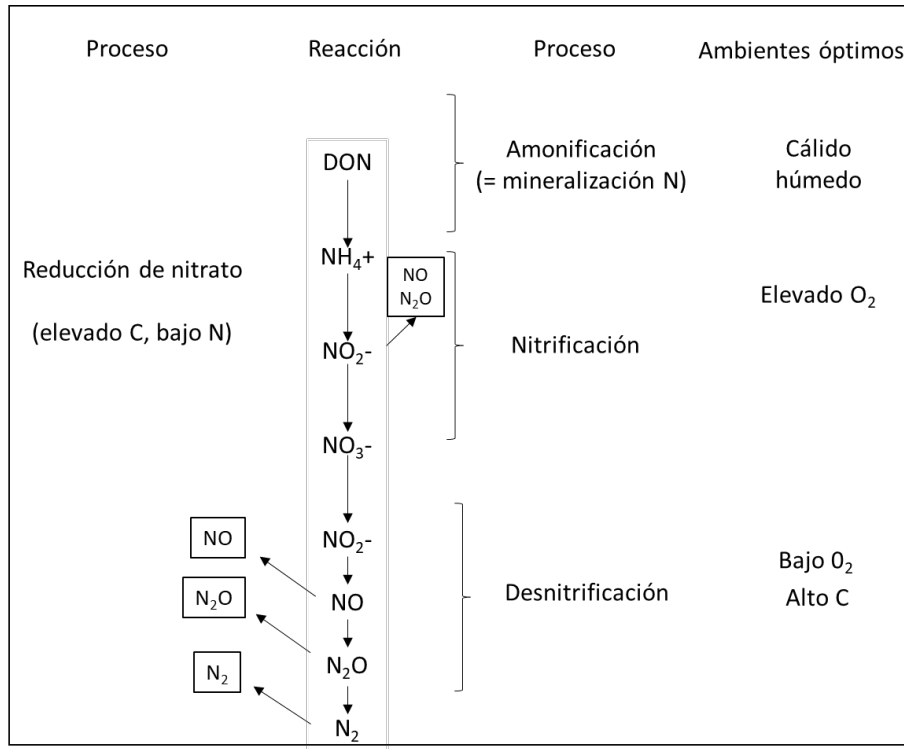
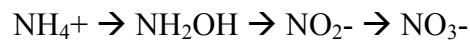


Figura 4. Proceso de emisión de N₂O en el suelo (adaptado de Chapin *et al.*, 2002)

En el proceso de nitrificación se da la oxidación del amonio (NH₄⁺) a nitrito (NO₂⁻) vía NH₂OH (oxiamoniaco), y luego a nitrato (NO₃⁻). Proceso aeróbico que produce N₂O como subproducto, generado por bacterias autótrofas (*Nitrosomonas*).



Los principales factores que afectan que afectan a la nitrificación son:

- **Contenido de amonio:** el amonio es el sustrato para las bacterias nitrificantes, por ellos es el requerimiento esencial para la nitrificación.
- **pH:** Los límites entre los que la nitrificación tiene lugar se sitúa entre 5.5 y 8, con optimo entre 6.9 y 7.5.
- **Aireación del suelo:** las bacterias nitrificantes son microorganismos aerobios típicos, necesitando oxígeno molecular para producir nitratos.

- **Humedad del suelo:** la nitrificación disminuye en condiciones de excesiva humedad o en aquellas de escasez. La humedad óptima es de alrededor de 60% del espacio poroso con agua.
- **Temperatura:** la temperatura favorable para el proceso de nitrificación se sitúa entre 27 y 30°C y disminuye su velocidad e intensidad a medida que los suelos se enfrían.

En el proceso de desnitrificación el Nitrato (NO_3^-) y el nitrito (NO_2^-) son reducidos para dar óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N_2O) y dinitrógeno (N_2), el cual es un proceso anaeróbico, requiere carbono reducido como suplemento de energía y NO_3^- como sustrato.



En este proceso, el N_2O es un intermediario obligatorio. La desnitrificación es un proceso anaeróbico que requiere carbono reducido como suplemento de energía y NO_3^- como sustrato. Esta transformación es realizada por microorganismos anaeróbicos, que al momento de no haber oxígeno disponible, utiliza el NO_3^- como aceptor terminal de electrones (Machefert *et al.*, 2002).

Las condiciones que favorecen este proceso son:

- **Condiciones de anaerobiosis:** se presentan en sitios con encharcamientos e inundaciones. Los microorganismos desnitrificantes utilizan el oxígeno del nitrato para respirar.
- **Temperatura:** temperatura óptima entre 25 y 35°C, pero puede ocurrir entre los 2 y 50°C.
- **pH:** neutro a ligeramente alcalino

2.7. Relación Carbono/Nitrógeno en el suelo

La materia orgánica del suelo (MOS) es uno de los recursos naturales más importantes, y es la base de la fertilidad del suelo (Sparks, 1999). La materia orgánica del suelo puede ser de origen vegetal, animal y microbiano, y consiste de un conjunto de materiales en varios estados de descomposición por la acción de procesos bióticos y abióticos (Baldock y

Skjemstad, 2000). El proceso de mineralización de la MOS libera carbono a la atmósfera como CO_2 , mientras algo de carbono es asimilado en los tejidos microbianos, por ejemplo, en la biomasa microbiana, y otra parte se convierte en sustancias húmicas a través del proceso de humificación (Sparks, 1999). La función más importante de la materia orgánica del suelo es que proporciona la energía metabólica que dirige los procesos biológicos del suelo y los efectos directos e indirectos que esto tiene en otras propiedades y procesos del suelo (Sparks, 1999). El carbono fijado en el proceso de la fotosíntesis es depositado en el suelo durante el crecimiento de las plantas, y por este medio se proporciona el sustrato de carbono a los organismos del suelo que descomponen física y químicamente la estructura orgánica (Tan, 2003). Los organismos del suelo (biota), usan los residuos de las plantas y los animales y los derivados de la materia orgánica como alimentos. A medida que descomponen los residuos y la materia orgánica, los nutrientes son liberados dentro del suelo en formas que pueden ser absorbidas por las plantas (Sparks, 1999; Tan, 2003) (Fig. 5).

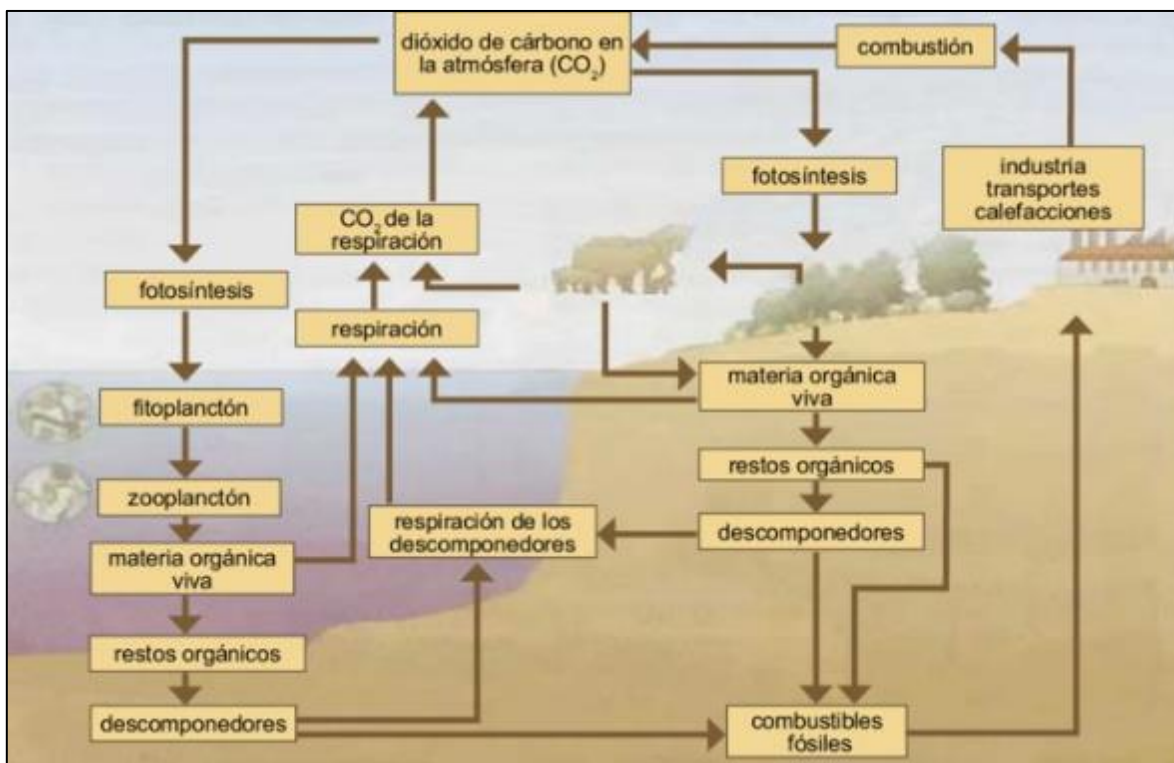


Figura 5. Ciclo del Carbono tomado de Cuellar *et al.* (2015).

La mineralización de la materia orgánica del suelo en los ecosistemas naturales y perturbados, es una fase de alta prioridad para el suministro de nitrógeno inorgánico (Curtin y Campbell, 2008; Jarvis *et al.*, 1996). El amonio (NH_4^+) es el producto inicial de la mineralización heterótrofa y después por oxidación (realizada por microorganismos autótrofos) se transforman a nitrato (NO_3^-) a través del proceso conocido como nitrificación (Havlin *et al.*, 1999). Las concentraciones de amonio y de nitratos en el suelo, son de gran importancia durante el período de crecimiento de las plantas (Havlin *et al.*, 1999). De los nutrimentos que las plantas necesitan para su crecimiento, el nitrógeno es requerido en mayor cantidad a la que habitualmente se encuentra en forma disponible en el suelo. Las formas de nitrógeno asimilables por la planta son NH_4^+ y NO_3^- (Havlin *et al.*, 1999). El suministro de nitrógeno al suelo es sensible a los factores que controlan la mineralización potencial del nitrógeno (por ejemplo, las propiedades del suelo y las prácticas de manejo) y a condiciones ambientales (por ejemplo, humedad y temperatura) que regulan la actividad biótica (Zebarth *et al.*, 2009).

2.8. Emisiones de N_2O del sector agropecuario

El impacto ambiental como generación de gases de efecto invernadero, eutrofización de cuerpos de agua y sobrecarga de nutrientes en suelos de cultivo ocasionado por excretas de ganado, dependerá en gran medida de la especie pecuaria, del sistema de alimentación y del manejo del estiércol (Pinos-Rodríguez *et al.*, 2012). Las descargas a la atmósfera provenientes del estiércol incluyen polvo, olores y gases producto de la digestión anaeróbica y descomposición aeróbica (Miner *et al.*, 2000 citado por Pinos-Rodríguez *et al.*, 2012). Entre los contaminantes liberadas por el estiércol hacia la atmósfera destaca el amoniaco, así como otros gases de efecto invernadero (GEI) que incluyen metano y óxido nitroso. De acuerdo al Banco Mundial (2019), México contribuyó con 43.436 (miles de toneladas métricas de equivalente de CO_2) de emisión de Óxido Nitroso en el año 2012. Un porcentaje significativo de la producción de cultivos en el mundo se destina a la alimentación del ganado y se aplican fertilizantes minerales a muchas de las áreas de cultivos correspondientes. Los pastizales manejados intensivamente también reciben una porción importante de fertilizantes minerales. Entre el 20 y 25 por ciento del uso de fertilizantes (cerca de 20 millones de toneladas de N) puede ser atribuido a la producción de

piensos para el sector pecuario (Steinfeld *et al.*, 2009). La aplicación de fertilizantes nitrogenados puede aumentar la emisión de óxido nitroso (N_2O). El óxido nitroso es un gas de efecto invernadero (GEI) que posee aproximadamente 300 veces el efecto de calentamiento del dióxido de carbono (Asociación Geoinnova, 2019).

El nivel de emisiones de la aplicación de fertilizantes nitrogenados depende del modo y el momento de la aplicación del fertilizante, además del tipo de fertilizante (Steinfeld *et al.*, 2009). Las estimaciones de FAO (2001) dan como resultado una tasa de pérdida del 1 por ciento de $N-N_2O$ proveniente de la fertilización mineral.

Los cultivos de leguminosas forrajeras también producen emisiones de N_2O , aunque generalmente no reciben fertilización nitrogenada debido a que los rizobios en los nódulos de sus raíces fijan nitrógeno que puede ser utilizado por las plantas. Hay una serie de estudios que demuestran que estos cultivos poseen un nivel de emisiones de N_2O similar al de los cultivos fertilizados (Steinfeld *et al.*, 2009).

2.8.1. El parche de orina en los sistemas de pastoreo

Dentro de los sistemas agropecuarios, las praderas son consideradas como la mayor fuente de N_2O , debido a las excreciones de estiércol y orina por parte de los animales a través de los cuales se eliminan entre el 75 y el 90% del N consumido por los animales en pastoreo (Li *et al.*, 2015), debido a que los rumiantes son poco eficientes en el consumo de N en la dieta, convirtiendo entre el 5% y 30% del N consumido en producto, excretando el resto (Oenema *et al.*, 2005).

La mayor parte del N excretado se devuelve en forma de orina, la cual contiene N en formas más disponibles que el estiércol. A medida que aumenta la ingesta de N, la proporción de N excretado en el estiércol permanece constante, mientras que la proporción excretada en la orina aumenta (Jarvis *et al.*, 1995). Además, la tasa de N en la orina excede los requerimientos de N del pasto y el exceso es vulnerable a la pérdida.

El IPCC (2001) sugiere un factor de emisión para N_2O por excrementos animales (estiércol y orina) en praderas del 2% del N depositado. Estudios sugieren que la proporción de N perdido como N_2O se encuentra entre el 0,1 a 4% del N en la orina y de 0,1 a 0,7% del N en

el estiércol (Oenema *et al.*, 1997). Los volúmenes de orina excretada por los bovinos muestran variaciones a lo largo del día, y en promedio la excreción diaria total de orina es de 12.6 L y la de N de 65.7 g, el N excretado en la orina depende del N consumido (Kertz *et al.*, 1970 citado por Berger, 2011).

Los factores más importantes que influyen en la concentración de N en la orina son la ingesta de N (lleva la cantidad de N excedente al requerimiento metabólico) y la ingesta de agua (afecta tanto el volumen como la frecuencia de micción), no obstante, Una dieta alta en N no corresponde necesariamente con una alta concentración de N en la orina: La ingesta de agua tiende a aumentar en las dietas altas en N, lo que ayuda a diluir el N en la orina (Selbie *et al.*, 2015). La urea es la mayor proporción de N urinario, pero también incluye alantoína, ácido hipúrico, creatina, creatinina y amoníaco. A medida que aumenta la ingesta de N, la proporción de N urinario presente como urea aumenta (Topps y Elliott, 1967; Petersen *et al.*, 1998)

2.9. Mitigación de N₂O

Dadas las condiciones de manejo de las pasturas, el clima, y la baja fertilidad de suelos, la ganadería se encuentra dentro de las actividades con mayor intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases son principalmente el metano (CH₄) el cual es producto de la fermentación entérica y de la mineralización del estiércol de los animales bajo pastoreo, dióxido de carbono (CO₂) producto del cambio en el uso del suelo y el óxido nitroso (N₂O), el cual surge de los procesos de nitrificación y desnitrificación que son parte del ciclo natural del nitrógeno en el suelo.

Durango y colaboradores (2017) mencionan que la mitigación de la producción de estos gases representa un reto para la actividad agrícola en todo el mundo, para lo cual se han depositado los mayores esfuerzos en la búsqueda de estrategias para reducir dichas emisiones que van encaminadas directamente hacia un manejo adecuado de las praderas (intensidad de pastoreo), hacia el mejoramiento de la calidad composicional de los pastos, así como diseñar prácticas que mejoren las condiciones físico-químicas del suelo, ya que estos son factores claves para la sostenibilidad dentro de los sistemas agropecuarios.

Los sistemas de pastoreo tienen un impacto ambiental significativo, con implicaciones a nivel social. La productividad y calidad de los forrajes mejora con la aplicación de fertilizantes nitrogenados y con el reciclaje de nutrientes. Por esto, el uso del N en la pradera requiere de una optimización, por lo cual se han implementado nuevas prácticas de manejo de pastoreo en los sistemas ganaderos, mejorando la eficiencia de las plantas en la captación de N y disminuyendo el N que se escapa del sistema a través de pérdidas de N gaseoso, como amoníaco (NH_3) y óxido nitroso (N_2O) (**Fig. 6**) (Oenema, 2006)

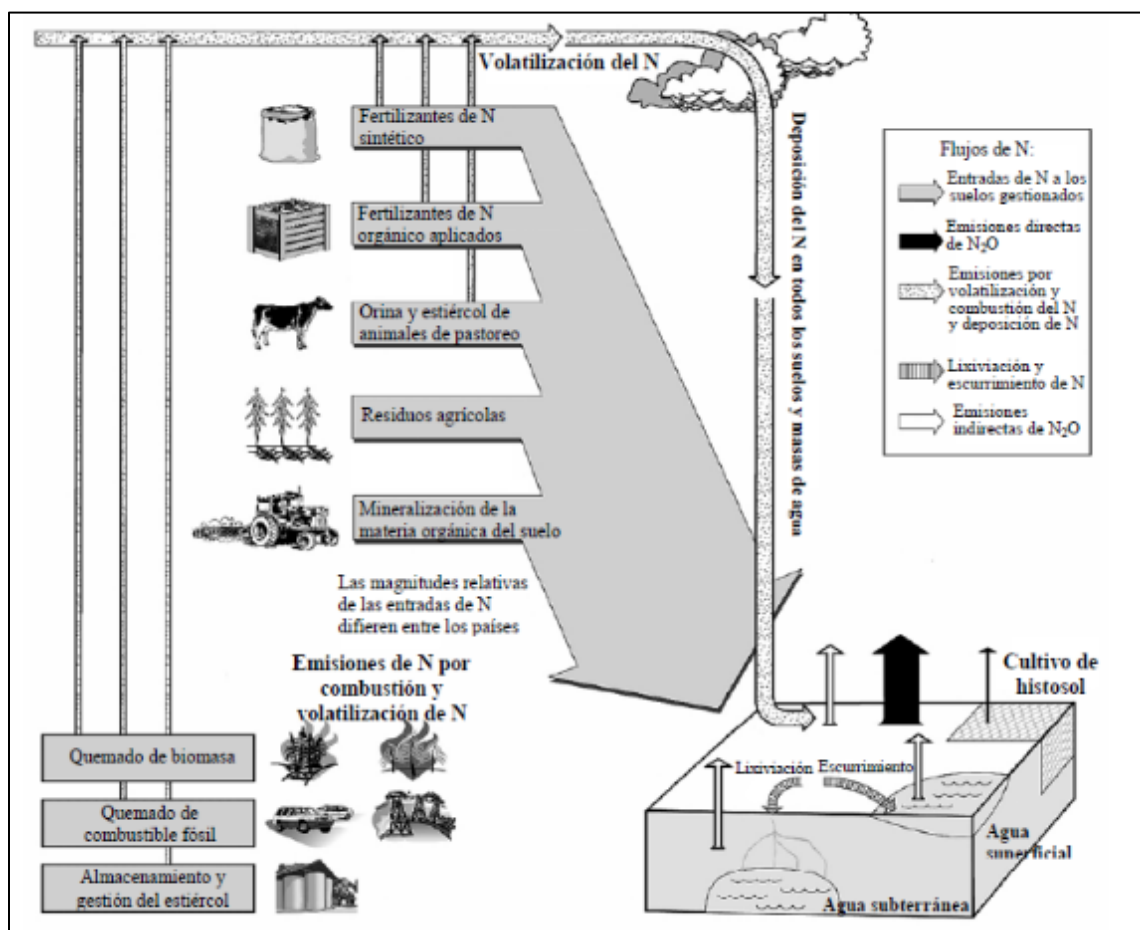


Figura 6. Fuentes de N aplicado a los suelos (IPCC, 2006).

2.9.1. Los sistemas silvopastoriles y aportes a la mitigación del cambio climático

La producción ganadera basada principalmente en el uso de sistemas extensivos de pastoreo genera niveles bajos de rentabilidad. Dadas las condiciones de manejo de las pasturas, el

clima, y la baja fertilidad de suelos, la ganadería se encuentra dentro de las actividades con mayor intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Los sistemas silvopastoriles son una herramienta que responden a la necesidad de convertir a la ganadería en una actividad rentable la cual genera bienes para la población con inocuidad, bienestar animal y al mismo tiempo genera servicios ambientales como protección de fuentes de agua, ayuda a la fertilidad del suelo y conservación de la biodiversidad, comenzando a considerarse como una herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático (Murgueitio *et al.*, 2014). El incremento en la productividad primaria del agroecosistema ganadero al tener más árboles, arbustos forrajeros, arvenses y pastos vigorosos contribuye a mitigar el cambio climático a través de varios mecanismos que se resumen así:

- Incremento de los depósitos de carbono en el suelo y la vegetación leñosa.
- Reducción de emisiones de metano por mayor eficiencia en el rumen del ganado.
- Menores pérdidas de nitrógeno hacia la atmósfera por rápido y eficiente reciclaje de excretas.

Los monocultivos en comparación con los SSP presentan baja tolerancia a la sequía por lo que en época seca disminuye la calidad de su forraje y la producción de materia seca, afectando la productividad animal; en contraste, con los SSP se evidencia mayor estabilidad en la producción y disponibilidad de forraje y nutrientes durante todo el año, mejora en la biodiversidad y alta contribución en la sostenibilidad de los ecosistemas. Por otro lado, la mayoría de las plantas empleadas en estos sistemas han mostrado valores nutricionales superiores a los de las gramíneas comúnmente utilizadas para el pastoreo, por lo que es posible obtener mayores niveles de producción en los sistemas ganaderos (Broom *et al.*, 2013; Murgueitio *et al.*, 2015).

En un SSPi se puede producir entre 12 y 4,5 veces más carne bovina que en el pastoreo extensivo y que en las pasturas de pastos mejorados sin árboles, respectivamente. Otras ventajas comparativas de los SSPi se relacionan con la disminución de sus aportes al CC a través de varios mecanismos tales como el incremento de los depósitos de carbono en el suelo y la vegetación, la menor emisión de metano gracias a la mayor eficiencia en el

rumen del ganado, menores pérdidas de nitrógeno hacia la atmósfera por rápido y eficiente reciclaje de excretas y nutrientes y, mejores parámetros reproductivos del hato (Murgueitio *et al.*, 2013, 2014).

La presencia de árboles en altas densidades en los potreros produce sombra, reduce las altas temperaturas, mejora la productividad y calidad de los forrajes, mantiene la humedad de los suelos, reduce la estacionalidad de la producción de carne y leche, y favorece la producción y reproducción de los bovinos (Murgueitio *et al.*, 2014). Las especies leñosas forrajeras más utilizadas son en general de usos múltiples (forraje, abono verde, sombra, cercos, rompe vientos comida, leña, madera, etc.). Muchas de las especies arbóreas forrajeras son leguminosas fijadoras de nitrógeno. La presencia de leguminosas en los potreros tiene un efecto directo en la mitigación de las emisiones de N₂O del suelo al disminuir la disponibilidad de nitrato para la desnitrificación (Gallego-Castro *et al.*, 2014).

En relación al N₂O, es importante considerar que en proyectos forestales de remoción de GEI se ha cuestionado la inclusión de especies leguminosas argumentando que por los procesos de nitrificación/desnitrificación de N del suelo mediante su fijación biológica se incrementan las entradas de N₂ en el suelo produciendo un incremento en las emisiones de N₂O a la atmósfera y, en consecuencia, un aumento de las emisiones de GEI totales (Rochette y Janzen, 2005; Salinas y Hernández, 2008). Rivera y colaboradores (2015) mencionan dentro del trabajo “Determinación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de la orina y estiércol bovino en dos sistemas de pastoreo orientados a la producción de leche”, que obtuvieron como resultado que las emisiones de N₂O en un sistema silvopastoril intensivo con *Leucaena leucocephala* puede emitir menores cargas de GEI, referente al N₂O en estiércol, al emitir 1854 µg m² h⁻¹ y en orina 2236 µg m² h⁻¹ comparado con un sistema intensivo convencional que emitió en estiércol 4663 µg m² h⁻¹ y en orina 15399 µg m² h⁻¹. Al observar los flujos de las praderas, estos mismos autores encontraron que las emisiones de GEI de un sistema con *Leucaena* fueron similares a las de un bosque ($p > 0,05$) y muy inferiores a las de un sistema de gramíneas en monocultivo con riego y fertilización ($p = 0,001$). En sus resultados, la alta intensidad de fertilización en el sistema convencional (420 kg de N ha⁻¹ año⁻¹) y el riego, indudablemente, favorecieron las condiciones para incrementar procesos de desnitrificación y, por ende, las

emisiones netas de N₂O hacia la atmósfera. Sin embargo, aún hoy es escasa la bibliografía científica disponible sobre el efecto real que tiene la utilización de este tipo de plantas en las emisiones finales de N₂O.

Naranjo *et al.* (2012) concluye que los SSP, solos y asociados a maderables, pueden contribuir mitigar el cambio climático, porque cuentan con una tasa de remoción anual GEI de 17,013 y 34,778 kg CO₂ eq/ha/año respectivamente.

2.9.2. *Inclusión de Leucaena leucocephala en la dieta.*

En los últimos años se ha comprobado que existen abundantes evidencias sobre las ventajas nutricionales de *L. leucocephala* para la alimentación de rumiantes y su contribución para generar sistemas más productivos y sostenibles en condiciones tropicales (Gaviria *et al.*, 2015; Murgueitio *et al.*, 2015). Debido a su alta producción de forraje y calidad nutricional, en los sistemas que incluyen esta leguminosa es posible emplear una mayor carga animal por hectárea y obtener ganancias de peso y producciones superiores de leche en rumiantes, respecto a las que se alcanzan en otros sistemas forrajeros tropicales (Gaviria *et al.*, 2015).

De ahí que la intensificación de la ganadería bovina con el uso de *L. leucocephala*, principalmente en sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi), contribuya a la provisión de forrajes de buena calidad, la rehabilitación de ecosistemas degradados y la mitigación y adaptación al cambio climático. Las menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a este tipo de sistemas se deben tanto a las características de sus forrajes como a su mayor eficiencia productiva (Molina *et al.*, 2013; Rivera *et al.*, 2016).

Entre las mejores aplicaciones de la *Leucaena leucocephala* figura su empleo como especie forrajera, tanto para sistemas de pastoreo extensivo o intensivo, así como para sistemas de corte y acarreo para pequeños productores (Pound y Martínez, 1983). En la actualidad, la *Leucaena* se cultiva como forraje en Australia, África, México, Cuba, República Dominicana, Haití y en toda América Central.

La *Leucaena* es bien conocida por su alto valor nutricional y por la similitud de su composición química con la de la alfalfa. Sin embargo, el forraje de *Leucaena* puede ser

bajo en sodio y yodo, pero es alto en β -caroteno. Los taninos en las hojas y especialmente en los tallos de *Leucaena* reducen la digestibilidad de la materia seca y las proteínas, pero aumentan el valor de "derivación" de las proteínas.

Jones (1979) menciona que los valores de digestibilidad e ingesta de *Leucaena* oscilan entre 50 y 71% y entre 58 y 85 g / kg 0,75 de peso vivo respectivamente, sugiriendo que los valores más bajos se asociaran con los efectos de la mimosina en la ingesta cuando se alimentaban con dietas puras de *Leucaena*.

De acuerdo a Gaviria-Uribe *et al.* (2015) y Rivera-Herrera (2017), los animales que pastorearon en SSPi con presencia de *Leucaena leucocephala* tuvieron consumos de MS hasta 1,3 veces más que aquellos que pastorearon en sistemas convencionales de pastoreo. El consumo de *Leucaena* en los SSPi, puede representar entre el 25 y el 30% del total de MS ingerida.

Consumos de follaje de *Leucaena* entre 1.5 y 2.3 kg de MS animal/día promueven la productividad de bovinos sin riesgo de efectos negativos (Mahecha *et al.*, 2007; López *et al.*, 2015). Ortega y colaboradores (2009) señalan que en SSP con *Leucaena* el consumo de esta especie puede ser de hasta 2.6 kg de MS animal/día sin efectos detrimentales siempre que haya alta disponibilidad de forraje de las gramíneas asociadas, Mahecha *et al.* (2007) coinciden en señalar la importancia de abundante oferta de forraje de gramíneas para reducir el riesgo de intoxicación en bovinos por el consumo de *Leucaena*.

Molina *et al.* (2015) en el trabajo "inclusión de *Leucaena leucocephala* reduce la producción de metano de terneras Lucerna alimentadas con *Cynodon plectostachyus* y *Megathyrsus maximus*" donde las dietas evaluadas fueron una tradicional, compuesta de 46% de pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*) y 54% de pasto guinea (*Megathyrsus maximus*) y una representativa del consumo en un SSPi, con 31% de *C. plectostachyus*, 43% de *M. maximus* y 27% de *Leucaena (Leucaena leucocephala, L)*, el Consumo de Materia Seca (Kg/día) fue de 6.5 y 8.0 respectivamente.

2.10. Técnicas de cuantificación de gases de efecto invernadero en suelos

La precisión de las mediciones de GEI es crucial para actualizar y mejorar los actuales inventarios de gases de efecto invernadero que cada país necesita para desarrollar su plan de mitigación y reducción de emisiones. La mayoría de metodologías para la medición de GEI *in situ* se pueden dividir en las dos técnicas más usadas: técnicas basadas en cámaras, técnicas basadas en herramientas micro meteorológicas o Eddy Covarianza y como complemento modelación ambiental (Muñoz *et al.*, 2011; Saggar *et al.*, 2009; Jones *et al.*, 2011).

2.11. Técnicas de medición de emisiones de N₂O

Actualmente se han desarrollado varios tipos de cámaras, entre las cuales se destacan las cámaras dinámicas y la cámara estática cerrada, la primera integra un analizador de gases y un sofisticado sistema automatizado que minimiza los errores de muestreo derivados de la técnica, a pesar de reducir los errores de medición y de obtener más datos, sus costos de operación la hacen menos asequible, en contraste, la cámara estática cerrada posee un diseño de bajo costo más sencillo y más práctico para trabajar en campo pero con algunos sesgos asociados al diseño. El **cuadro II**, presenta las limitaciones técnicas entre cámaras estáticas y las técnicas micro meteorológicas.

CUADRO II. COMPARACIÓN ENTRE LAS TÉCNICAS DE LA CÁMARA ESTÁTICA Y LAS TÉCNICAS MICRO METEOROLÓGICAS.

Limitaciones técnicas	Técnicas	Cámaras estáticas	micro meteorología
	Costo de instalación	de Medio	Muy alto
	Nivel técnico requerido	Básico	Muy alto
	Carga laboral humana	Muy importante	Importante
	Limitaciones de uso	Puede ser usada en cualquier lugar	Solo puede ser usada en grandes extensiones planas de tierra

	Sesgo metodológico	Las perturbaciones dinámicas pueden afectar las concentraciones de gases dentro de la cámara. Explora una pequeña porción espacial y temporal del sistema.	Se debe asegurar tener en cuenta las condiciones atmosféricas y la circulación del viento de forma precisa. Considerar las diferentes fuentes de emisión.
Desempeño	Representatividad	Mediciones puntuales en el tiempo y el espacio	Medidas integradas en tiempo y en espacio
	uso	Comparación de diferentes prácticas agrícolas y usos de suelo	Estimación de flujos de gases en situaciones de ecosistemas representativos.

Fuente: Jones *et al.* (2011).

2.11.1. Cámara estática

El método de la “cámara estática” permite capturar las emisiones de gases que se producen desde el suelo, mediante recipientes herméticamente sellados (cámaras) insertados en el suelo. En el caso del óxido nitroso, el gas proviene fundamentalmente de las reacciones mediadas por microorganismos en el suelo y bajo tres mecanismos (Dalal *et al.*, 2003): nitrificación (usando nitritos como aceptores de electrones), desnitrificación por reducción desasimilatoria de nitratos y desnitrificación por reducción asimilatoria de nitratos.

2.11.2. Cámara estacionaria manual

Saggar *et al.*, (2004) trabaja con cámaras metálicas, plásticas o de PVC, compuestas por una tapa que puede ir sobre un anillo lleno de agua colocado sobre el suelo o sobre una rosca de caucho, procurando siempre generar condiciones impermeables que bloqueen el paso de aire entre el suelo y la tapa (**Fig. 7**). En esta última se abren dos agujeros, uno que contendrá un tapón de caucho y otro que llevará una septa, de la cual se toman las muestras de N₂O con ayuda de una jeringa de polipropileno y una válvula de tres pasos conectada a ella, para asegurar el paso limpio del aire de la cámara a un vial al vacío, para posterior

análisis por cromatografía de gases. Al momento de muestrear, la cámara se tapa y de ella se toman de 3 a 5 muestras durante un periodo no mayor a 60 minutos, con un intervalo de 5 a 20 minutos entre viales. Más del 95% de las publicaciones sobre N-N₂O usan esta metodología.



Figura 7. Cámara estacionaria manual.

Existen métodos de medición de óxido nitroso más tecnificados los cuales se mencionan en el **cuadro III**.

CUADRO III. TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE N₂O.

Técnica

Mediciones de N-N₂O
colectadas por el método de
cámaras estacionarias
automáticas.



Mediciones de N-N₂O
colectadas por el método micro
meteorológico.



Mediciones de N-N₂O
colectadas por una torre.



Fuente: Vistoso (2015).

III. JUSTIFICACIÓN

La ganadería es la actividad humana que ocupa una mayor superficie de tierra. La expansión de la producción ganadera es un factor fundamental en la deforestación, impacto en recursos globales como el agua, la tierra y la biodiversidad y contribuye significativamente al cambio climático a través emisión de **Gases de Efecto Invernadero (GEI) como Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄) Y Óxido nitroso (N₂O)**. La emisión de GEI a partir de la ganadería bovina representa la fuente más importante de GEI del sector agropecuario de México. Los animales y sus desechos emiten gases que inciden en el cambio climático, además de que la destrucción de los bosques para su conversión en zonas de pastoreo y tierras de cultivo destinadas a la producción de alimentos para el ganado, y el manejo que en estas se lleva a cabo, como la aplicación de fertilizantes nitrogenados pueden aumentar la emisión del gas de efecto invernadero N₂O que tiene un tiempo de vida de 120 años, y un potencial de calentamiento global de 310, además de ser un precursor de la destrucción del ozono troposférico. Una herramienta de mitigación dentro de la producción ganadera es la implementación de los sistemas silvopastoriles con asociaciones de especies leñosas (gramíneas/leguminosas) y animales, para satisfacer múltiples objetivos como la recuperación de suelos, el aumento de productividad, la restauración de ecosistemas entre otros, a los cuales se suman la mitigación al cambio climático. En relación a la emisión de N₂O, la inclusión de especies leguminosas en praderas de gramíneas se ha cuestionado debido a que los bovinos son poco eficientes en convertir el N consumido en los SSP con leguminosas en productos como carne y leche, excretando hasta un 90% de N en orina y heces, aumentando las emisiones de N₂O a través de los procesos de nitrificación y desnitrificación por un exceso de N en el suelo. No

obstante, se requieren estudios para conocer el efecto real de la utilización de asociaciones gramíneas-leguminosas en los SSP por bovinos y el tiempo de uso en los diferentes arreglos de SSP para disminuir la emisión de N₂O por las excretas depositadas en suelo por los bovinos.

IV. HIPÓTESIS

La emisión de óxido nitroso debido a la concentración de urea en el parche de orina de bovinos simulando un sistema silvopastoril, incrementa cuando el nivel de inclusión de *Leucaena leucocephala* en la dieta es del 33.3%, en la época de estiaje en el trópico seco.

V. OBJETIVOS

a. General

Medir el efecto del incremento del nivel de *Leucaena leucocephala* en la dieta de bovinos, sobre la emisión de N₂O debido a la concentración de urea en el parche de orina, simulando un sistema silvopastoril en la época de estiaje en el trópico seco, mediante el uso de cámaras estáticas.

b. Específicos

- Cuantificar la emisión de N₂O del suelo debido a la concentración de urea en el parche de orina utilizando cámaras estáticas simulando un sistema silvopastoril (gramíneas/leguminosas) pastoreado por bovinos alimentados con diferentes niveles de heno de follaje de *Leucaena leucocephala* en la época de sequía.
- Generar información base de emisiones de N₂O del suelo debido a la concentración de urea del parche de orina de bovinos alimentados con diferentes niveles de inclusión de heno de follaje de *Leucaena leucocephala* simulando un sistema silvopastoril gramínea-leguminosa para obtener precedentes de la emisión local de N₂O en la época de sequía.
- Cuantificar la concentración de nitrógeno ureico (mg/dL) y de urea (mg/dL) en la orina de bovinos alimentados con diferentes niveles de inclusión de *Leucaena* en la dieta (0%, 16.6% y 33.3%).

- Estimar la disponibilidad de nitratos y amonio del suelo durante los periodos de muestreo.
- Determinar la humedad, y pH del suelo durante los periodos de muestreo.

VI. MATERIAL Y MÉTODO

El trabajo experimental se llevó a cabo en el sur del Estado de México, en la unidad de producción agropecuaria “Rancho El Peñón” (**Fig. 8**), en la localidad de El Peñón, ubicado en el municipio de Temascaltepec, a una latitud de 19°, 3', 4.85" y longitud de 100°, 6', 57.59", a 1845 msnm (**Fig. 9**). El lugar presenta una temperatura media anual entre 18 °C y 22°C (Villers & López, 1995).



Figura 8. Unidad de producción “Rancho el Peñón”.

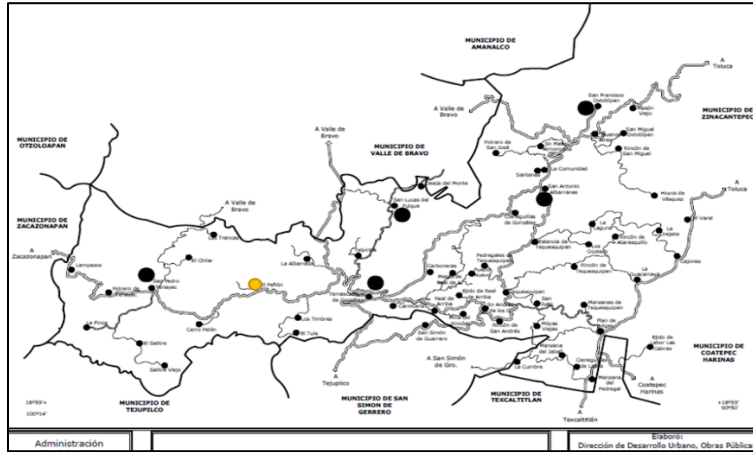


Figura 9. Localidad El Peñón, Municipio de Temascaltepec (H. Ayuntamiento de Temascaltepec, 2016).

El trabajo de campo se realizó durante el periodo de marzo-abril 2021, época de estiaje.

6.1. Pradera experimental

La medición de óxido nitroso se realizó en una pradera de *Cynodon plectostachyus* (0.5 has) establecida en el 2005 sin manejo de fertilización (**Fig. 10**). En la pradera se representó el sistema silvopastoril (gramínea-leguminosa arbórea), asperjando orina al pasto estrella africana *Cynodon plectostachyus*, la cual fue colectada de bovinos alimentados con diferentes proporciones de heno de follaje de *Leucaena leucocephala* y una dieta base de heno de *Cynodon plectostachyus*.



Figura 10. Pradera de *Cynodon plectostachyus*.

En la pradera antes de iniciar el experimento se realizó un análisis del suelo para determinar las características físicas y químicas: densidad aparente, densidad real, textura, pH, Nitrógeno, Fósforo, Potasio y materia orgánica (**Cuadro IV**).

CUADRO IV. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL SUELO AL INICIO AL INICIO DEL EXPERIMENTO

	pH	M.O %	Textura	D.R	D.A g/ml	NH ₃	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Fosforo	Potasio
						mg/L				
Inicio del experimento	5.8	0.67	Migajoso Arcilloso- limoso		0.97	8.5	9.0	8	2.5	18

M.O= Materia Orgánica (muy bajo <4.0); D.R. = Densidad Real; D.A.= Densidad Aparente;
NH₃= amoniaco; NH₄⁺= amonio; NO₃⁻= nitrato.

Animales para obtención de orina (tratamientos)

La orina se obtuvo de 6 becerras (Simmental), dos para obtener la orina en cada tratamiento, con peso vivo de 300 kg (± 50 kg). las cuáles fueron confinadas en corrales individuales de 4 x 4 m bajo la sombra, equipadas con bebederos y comederos individuales durante todo el experimento, con agua y sales minerales a libre acceso. Estuvieron una semana de adaptación a la dieta que consistió en una ración basal de heno de *Cynodon plectostachyus* y el consumo de heno de follaje de *Leucaena leucocephala* (**Cuadro V**). Las becerras se distribuyeron al azar y se asignaron de forma aleatoria la dieta para la obtención de orina (tratamiento) (**Fig. 11**)



Figura 11. Bovinos dobles propósito distribuidos al azar para obtención de orina.

CUADRO V. DIETAS OFRECIDAS PARA LA OBTENCIÓN DE ORINA.

Dietas	Heno de <i>Leucaena leucocephala</i>	Heno de <i>Cynodon plectostachyus</i>	PC	Consumo PC g /día/animal
	kg	kg	%	
A	0	9.0	7.78	702
B	1.5	7.5	12.6	1260
C	3.0	6.0	14.3	1430

Dieta A: 0 % inclusión de *Leucaena* en dieta, dieta B: 17 % inclusión de *Leucaena* y dieta, C: 33 % inclusión de *Leucaena*, PC: proteína cruda.

Los ingredientes de las diferentes dietas utilizadas se mezclaron y se ofrecieron de acuerdo al consumo de materia seca de cada animal (**Fig. 12**), es decir, 3% PV del peso del animal, en total se pesaron 9 kg por día de dieta por animal.



Figura 12. Mezcla de ingredientes para dietas.

El follaje de *Leucaena* fue cortado de un SSP establecido en el mismo rancho. Antes del comienzo de la prueba, el follaje de *Leucaena* se secó durante un periodo de 4 semanas bajo la sombra (**Fig. 13**).



Figura 13. Follaje de *Leucaena*.

6.2. Cámaras estáticas

Se utilizaron 12 cámaras cilíndricas, elaboradas con acero inoxidable, compuestas por una base que se mantuvo colocada sobre el suelo procurando generar condiciones impermeables que bloquearan el paso de aire entre el suelo y la tapa. Esta última cuenta con un septo, del cual se tomaron las muestras de N_2O con ayuda de una jeringa (**Fig. 14**).



Figura 14. Cámaras cilíndricas de acero inoxidable.

6.3. Desarrollo de experimento

Etapa 1. División de pradera y colocación de cámaras estáticas

La pradera se dividió en microparcels, en cada tratamiento se utilizaron tres micro parcelas (2 m x 1m), siendo un total de 12 micro parcelas (**Fig. 15 y Fig. 16**).

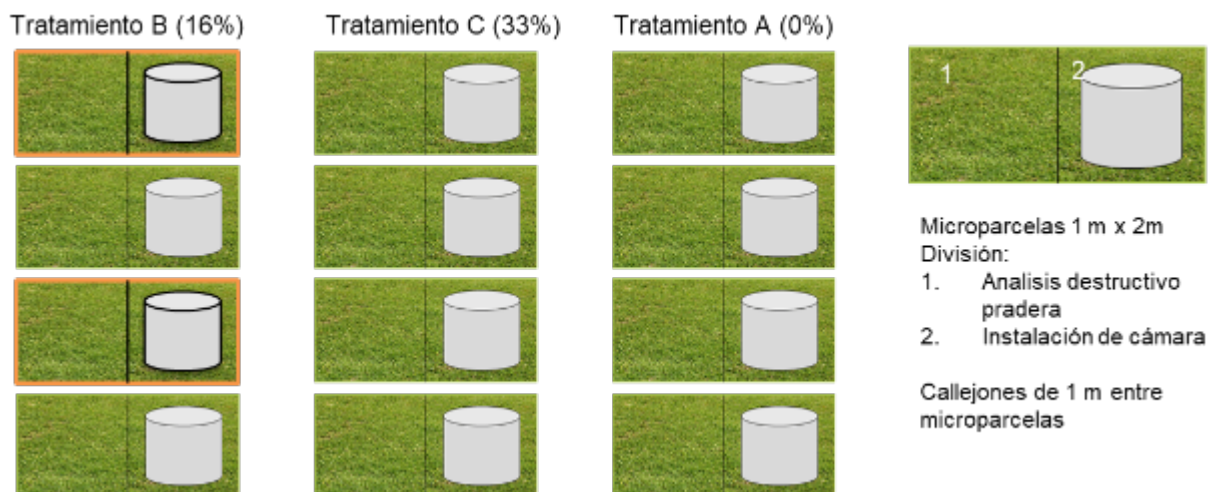


Figura 15. División de la pradera en parcelas subdivididas en dos segmentos o micro parcelas.



Figura 16. División de pradera en micro parcelas e instalación de cámaras estáticas.

Colecta de orina en bovinos para tratamientos

Para la colección de orina de cada tratamiento, se utilizaron 6 becerras con PV de 300 kg (\pm 50 kg) (Simmental), los bovinos se mantuvieron en confinamiento y tuvieron una semana de adaptación a la dieta. Después de la semana de adaptación, se recolectó orina durante 2 días (Chen *et al.*, 1992). Esta colecta se realizó para obtener la orina para la aplicación en las microparcelas y para estimación de Nitrógeno Ureico y de urea en cada tratamiento (**Cuadro VI**).

La recolección de orina se realizó al final de cada tiempo, de 8:00 a 12:00 am, 12:00 a 16:00 pm, 16:00 a 20:00 pm, 20:00 a 24:00pm y de 24:00 a 8:00 am, según propuesta de Chen *et al.* (1992) (**Fig. 17**).



Figura 17. Orina colectada de cada tratamiento ofrecido.

Se tomó una muestra spot de cada tratamiento para llevar a análisis y determinar Nitrógeno Ureico y Urea correspondiente a cada tratamiento al laboratorio Clínico MONAR.

CUADRO VI. CONTENIDO DE NITRÓGENO UREICO Y UREA EN ORINA DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS

Tratamiento	Nitrógeno Ureico	Urea	Urea
	mg / dL		kg/ha
A	74.6	159.6	20
B	137.0	293.0	36
C	382.0	631.5	79

Tratamiento A: 20 kg urea/ha en la orina de bovinos alimentados con 100 % heno de *Cynodon* + 0 % de *Leucaena*, Tratamiento B: 36 kg urea/ha en la orina de bovinos alimentados con 16 % de *Leucaena* + 84 % de *Cynodon* y Tratamiento C: 79 kg urea/ha en la orina de bovinos alimentados con 33 % de *Leucaena* + 67 % de *Cynodon*

Medición de N-N₂O en cámara estática

Periodo de muestreo

El periodo de muestreo tuvo una duración de 30 días.

Los parches de orina se simularon mediante la aplicación de orina en los segmentos de las microparcels de cada tratamiento. En el suelo de cada segmento se realizaron dos aplicaciones de orina, de 625ml/m² cada una en dos días consecutivos (**Fig. 18**). En el suelo del interior de la cámara (0.066m²) se aplicaron 41.25 ml. El parche de orina en los segmentos y en las cámaras fue similar entre tratamientos, pero la concentración de urea fue diferente.



Figura 18. Aplicación de orina en microparcels.

Tiempos de colecta de muestras

Los tiempos de colecta de muestra de N_2O fueron a los 0, 10, 20 y 30 minutos

Colección de gases y manejo muestras

Se utilizaron viales al vacío de 14 ml colectándose la muestra con sobre-presión.

- Los viales fueron llevados al Colegio de Posgraduados campus Montecillos, al laboratorio de cromatografía de Gases en el departamento de edafología (**Fig. 24**).



Figura 24. Análisis de muestras en el laboratorio de cromatografía de Gases en el colegio de Posgraduados.

Se utilizó un cromatógrafo de gases marca Shimadzu modelo GC-2014 Greenhouse Gas Analyzer (**Fig. 25**), equipado con un detector de captura de electrones (ECD).



Figura 25. cromatógrafo de gases marca Shimadzu modelo GC-2014 Greenhouse Gas Analyzer.

Las concentraciones de gas se convirtieron de ppm a μg de $\text{N}_2\text{O-N}$ por m^2 por hora utilizando la siguiente fórmula:

$$N_2O - N \text{ flux} = \frac{\delta N_2O * M\omega * V * 60}{A * Mvcorr}$$

Donde $\delta\text{N}_2\text{O}$ es la pendiente de N_2O (ppm/min), $M\omega$ es el peso molecular de N_2O ($\text{N}_2\text{O} - \text{N} = 28 \mu\text{g}/\mu\text{mol}$) V es el volumen de la cámara (m^2), A es la superficie del área medida de la cámara (m^2), 60 es el factor de conversión minutos a hora y $Mvcorr$ es el volumen molar corregido: $Mvcorr = 22.41 * 273.15 + \text{temp} / 273.15 * 0.8004$, donde 22.41 es el volumen molar (L) a temperatura y presión estándar de cualquier gas, 273.15 es el factor de conversión de $^{\circ}\text{C}$ a $^{\circ}\text{K}$, temp es la temperatura de la cámara ($^{\circ}\text{C}$) cuando está cerrada, ρ_0 es la presión del aire a nivel del mar (1 atm) y ρ_1 es la presión del aire en el sitio experimental (0.8004 atm).

Etapa 4. Mediciones agronómicas

En cada muestreo de medición de gas, se tomaron muestras al azar de suelo de la parcela cercana (análisis destructivo, **Fig. 26**) (de 1 m^2) de cada cámara de cada tratamiento, aproximadamente 200g, utilizando un cilindro, para determinar humedad, nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+).

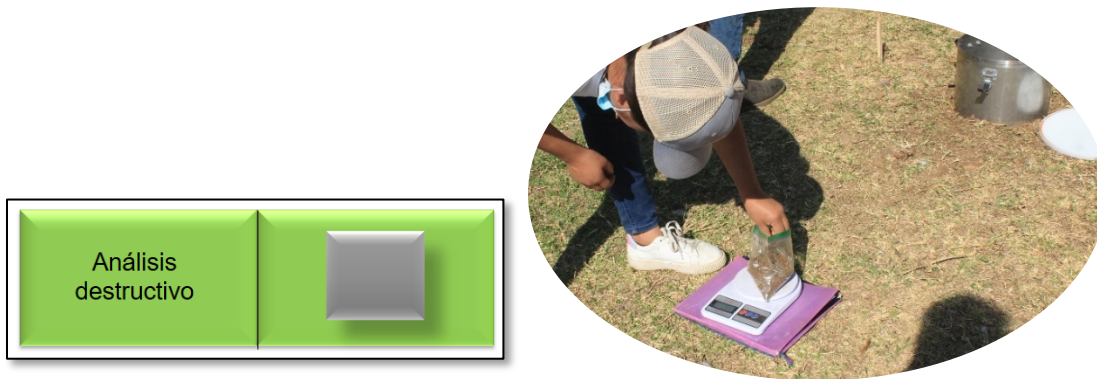


Figura 26. Segmento para análisis destructivo de mediciones agronómicas y ubicación de cámara estática.

- Las muestras de suelo se colocaron en una bolsa de nylon marcada (número de muestreo = tratamiento-# cámara), las cuales se llevaron a laboratorio de suelos para determinar nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+).

6.4. Diseño experimental y análisis estadístico

El Diseño experimental utilizado fue un completamente al azar con tres tratamientos y cuatro repeticiones, con medidas repetidas a través del tiempo.

El Modelo estadístico es:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + E_{ij}$$

- μ media general
- τ_i efecto del i-ésimo tratamiento $i=3$
- e_{ij} error experimental en la unidad j del tratamiento i

Los datos de emisiones de N_2O durante los 13 eventos se analizaron mediante el programa estadístico The SAS System for Windows 9.0. Se realizó un análisis de varianza ANOVA, comparación de medias a través de prueba Tukey y un análisis de correlación de Pearson para conocer las variables que influyeron en la emisión de N_2O .

VII. RESULTADOS

Flujo de N₂O-N m⁻² h⁻¹

Los patrones de flujo de emisión por hora de N₂O del suelo por orina de bovinos alimentados con diferentes porcentajes de *Leucaena leucocephala* en la dieta mostraron variabilidad a lo largo del periodo de muestreo, observándose un pico de emisión en el segundo día de aplicación de orina (Tratamiento A: 17.49 µg N₂O N m⁻² h⁻¹; Tratamiento B: 23.71 µg N₂O N m⁻² h⁻¹; Tratamiento C: 22.88 µg N₂O N m⁻² h⁻¹). Sin embargo, los resultados del análisis de varianza mostraron que los flujos de N₂O-N no tiene diferencias significativas entre tratamientos (P>0.05) es decir, que no existe evidencia significativa de un efecto debido al porcentaje de inclusión de *Leucaena* en la dieta de los bovinos para la emisión de N₂O por el contenido de urea en el parche de orina en la época de secas.

Efectos del periodo de muestreo

Los flujos de emisión de N₂O-N en los diferentes días de muestreo presentaron diferencias altamente significativas (p=0.000) Los resultados del presente estudio son consistentes con los reportados por Barneze et al. (2014), quienes observaron un aumento escalonado inmediato en la emisión de N₂O después de la aplicación de orina, entre los días uno y nueve con una tasa de emisión máxima el día tres de 1250 (± 337) µg N₂O-N m⁻² h⁻¹, en este trabajo se observa el aumento en la emisión de N₂O a partir de la aplicación de orina en el día tres y cuatro y al avanzar el periodo de muestreo decreció. Resultados similares reportaron Williams et al. (1999) y Kelly et al. (2008) al observar un pico en las emisiones de N₂O inmediatamente después de la aplicación de orina al suelo, para luego decrecer.

Características del suelo y temperatura

Humedad del suelo

Clough et al. (2004) reportaron una relación exponencial entre el flujo de N₂O y WFPS. Por lo tanto, el flujo acumulativo puede variar mucho según las condiciones de humedad del suelo en el momento de la aplicación de la orina y después, en este estudio se observó una relación entre picos de emisión y humedad en el periodo de muestreo, ya que se realizó en

la época de secas, sin presentarse eventos de lluvias, al realizarse solo un riego representativo al inicio del experimento, la humedad del suelo disminuyó conforme transcurrió el periodo de muestreo.

Amonio (NH_4^+) y NO_3^- en suelo

El contenido inicial de NH_4^+ en el suelo presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.001$), siendo para los tratamientos A, B y C de 10.87 mg/L, 8.75 mg/L y 9.62 mg/L respectivamente. El contenido de amonio del suelo en los muestreos presentó diferencias significativas ($p=0.000$), el NH_4^+ en el suelo aumento después de la aplicación de la orina, en el tratamiento C fue de 29 mg/L, en el tratamiento A 24 mg/L y en el tratamiento B 19.5 mg/L y en las siguientes mediciones el Amonio (NH_4^+) se mantuvo variable.

El contenido inicial de NO_3^- en suelo fue de 19 mg/L, 18.75 mg/L y 13 mg/L, para el tratamiento A, B y C respectivamente, incrementando a partir de la segunda fecha de muestreo, sin presentar diferencia significativa entre tratamientos ($p=0.163$) y muestreos ($p=0.114$). Esta información concuerda con lo que Dobbie et al. (1999) y Dobbie y Smith (2003), mencionan que los factores clave que afectan las emisiones de N_2O es la humedad del suelo y las concentraciones de N mineral en el suelo (NO_3^- , NH_4^+). Por su parte Yang et al. (2015) afirma que la mayor disponibilidad de NH_4^+ y NO_3^- , y alta humedad conducen a un aumento general de la actividad de nitrificación y desnitrificación que dio como resultado emisiones de N_2O mejoradas, mientras que menos N mineral y relativamente menos humedad podrían inhibir la producción de N_2O .

Potencial de hidrógeno

El pH inicial del suelo fue de 6.7, 6.60 y 6.60 para el tratamiento A, B y C, respectivamente y presentó variaciones entre los días de muestreo ($p=0.000$) pero no entre tratamientos ($p=0.967$). En este experimento, el tratamiento B presentó un descenso significativo en el pH a partir de la segunda fecha de muestreo. El pH aumentó a partir del primer día de aplicación de orina. Williams y Haynes (1994) indican que la hidrólisis de la urea es rápida, con 80-90% de la urea hidrolizada en 48 h, durante la conversión se producen iones de

hidróxido (OH), lo que el pH del suelo aumenta hasta de 8 en los primeros días después de la deposición de orina (Haynes y Williams 1992), en este trabajo se obtuvo un comportamiento similar encontrándose el primer pico de pH a las 48 h después de la primera aplicación de orina.

Relación entre el flujo de emisión de N₂O-N y parámetros ambientales y de suelo

El **cuadro I** muestra la relación positiva entre el flujo de N₂O y humedad del suelo ($r=0.569$, $P<0.00$), los datos son compatibles con la experiencia en los Países Bajos, donde Velthof y Oenema (1995) mostraron que los flujos más altos ocurrían cuando el suelo estaba húmedo y el WFPS excedía el 70 %, sin embargo, los flujos eran más pequeños durante el periodo seco, cuando el WFPS de la capa de 0-30 cm fue menor al 50 % para todos los sitios, de igual manera se presentó una relación positiva con el flujo de N₂O y NO₃⁻ ($r=0.38$, $P=0.01$), Numerosos autores mencionan una correlación positiva entre la disponibilidad de N inorgánico y las emisiones de óxido nitroso (Álvarez et al. 2012, Cosentino et al. 2013). Por el contrario, se observó una correlación negativa entre el flujo de N₂O y el pH del suelo ($r=0.41$, $P>0.05$), mismos datos que mostraron van der Weerden et al. (1999) donde en un estudio efectuado con enzimas desnitrificadoras encontraron una fuerte relación linear negativa entre el pH del suelo y la tasa de emisión de N₂O. Se observó una tendencia positiva entre el flujo de N₂O y la temperatura ambiental, sin embargo, esta no fue significativa ($r=0.3$, $P=0.06$). Las tasas de nitrificación y desnitrificación aumentan a medida que se incrementa la temperatura en ciertos rangos (Dalal et al. 2003), por lo que la emisión de N₂O pudo haber aumentado por el incremento de temperatura. En relación a los parámetros de suelo, se encontró una correlación positiva entre la humedad del suelo y nitratos ($r=0.501$, $P<0.00$), Dalal et al. (2003) mencionan que al limitarse la difusión de oxígeno en el suelo se da lugar al proceso de desnitrificación, ya que este es un proceso anaeróbico.

CUADRO I. RELACIÓN ENTRE FLUJO DE EMISION DE N₂O Y PARÁMETROS AMBIENTALES Y DE SUELO

Flujo µg	NH₄⁺	NO₃⁻	Temperatura, °C	Humedad
-----------------	-----------------------------------	-----------------------------------	------------------------	----------------

	$\text{N}_2\text{O N m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$				
Flujo					
$\mu\text{g N}_2\text{O N m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$					
1					
NH₄⁺	0.296				
	0.068				
NO₃⁻	0.380	0.092			
	<0.017	0.576			
Temperatura, °C	0.303	0.145	-0.247		
	0.061	0.380	0.130		
Humedad	0.569	-0.071	0.501	-0.105	
	<0.000	0.669	<0.001	0.524	
	-0.416	0.179	-0.166	-0.412	-0.525
pH	<0.008	0.276	0.312	<0.009	<0.001

NH₄⁺: Amonio, NO₃⁻: Nitrato, valor de r (correlación), valor de p

VIII. DISCUSIÓN

En la actualidad se reconoce el papel de los suelos como fuente principal de emisiones de N₂O, sin embargo, aún no se comprende completamente la complejidad de los procesos microbianos que en este proceso influyen y la interacción que tienen con aspectos bióticos como la diversidad microbiana, interacción planta-microorganismo y factores abióticos como la temperatura, humedad y precipitaciones, además de propiedades fisicoquímicas del suelo (INECC, 2018).

En este trabajo se observó que los flujos de N₂O-N no tiene diferencias significativas entre tratamientos ($P>0.05$), es decir, que no existe evidencia significativa de un efecto debido al porcentaje de inclusión de *Leucaena* en la dieta de los bovinos para la emisión de N₂O por el contenido de urea en el parche de orina en la época de secas, sin embargo, se presentó una relación positiva entre el flujo de N₂O y humedad del suelo ($r=0.569$, $P<0.00$), estos datos son compatibles con la experiencia en los Países Bajos, donde Velthof y Oenema (1995) mostraron que los flujos más altos ocurrían cuando el suelo estaba húmedo y el espacio poroso lleno de agua (WFPS) del suelo excedía el 70 %, sin embargo, los flujos eran más pequeños durante el periodo seco, cuando el WFPS de la capa de 0-30 cm fue menor al 50 % para todos los sitios. Este trabajo se desarrolló en una región del trópico seco en la época de secas donde al no haber presencia de lluvias, las emisiones de N₂O no fueron significativas.

Actualmente las metodologías creadas para la cuantificación de emisiones de N₂O por parte del IPCC, no toman en cuenta las clases de suelos, tipo de suelo o condiciones climáticas importantes dentro del proceso de emisión de N₂O, sólo las vías de incorporación de nitrógeno al suelo como aplicación de fertilizantes, abonos de origen animal, fijación biológica y mineralización de residuos, creando una incertidumbre del $\pm 50\%$ (IPCC, 2006) En este trabajo se consideró el factor suelo y sus características, condiciones climatológicas y además la vía de incorporación de nitrógeno al suelo mediante la aplicación de urea a través del parche de orina. En México, el Inventario de GEI, dentro de su metodología incluye las fuentes de nitrógeno para estimar N₂O las cuales son: fertilizantes sintéticos nitrogenados, estiércol depositado en pasturas y praderas por pastoreo y residuos agrícolas,

sin tomar en cuenta, los factores abióticos y las relaciones entre microorganismos y plantas, y las condiciones edafológicas del suelo (pH, humedad, disponibilidad de N, temperatura, etc.) (SEMARNAT-INECC, 2018), notando su importancia dentro de estas mediciones.

Además, Dobbie *et al.* (1999) y Dobbie y Smith (2003), mencionan que los factores clave que afectan las emisiones de N₂O es la humedad del suelo y las concentraciones de N mineral en el suelo (NO₃⁻, NH₄⁺). Por su parte Yang *et al.* (2015) afirma que la mayor disponibilidad de NH₄⁺ y NO₃⁻, y alta humedad conducen a un aumento general de la actividad de nitrificación y desnitrificación que da como resultado emisiones de N₂O mejoradas, mientras que menos N mineral y relativamente menos humedad podrían inhibir la producción de N₂O. En este trabajo la disponibilidad de NH₄⁺ Y NO₃⁻ se debió al parche de orina.

Los SSP presentan diversas ventajas como ser una herramienta que responde a la necesidad de convertir a la ganadería en una actividad rentable la cual genera bienes para la población con inocuidad, bienestar animal y al mismo tiempo genera servicios ambientales como protección de fuentes de agua, ayuda a la fertilidad del suelo y conservación de la biodiversidad, comenzando a considerarse como una herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático (Murgueitio *et al.*, 2014), sin embargo, en este trabajo se demuestra que existe emisión del GEI óxido nitroso por el consumo de niveles crecientes de *Leucaena* debido al parche de orina, no obstante, las emisiones se vieron afectadas por las características de suelo, específicamente el porcentaje de humedad.

IX. CONCLUSIÓN

El nivel de inclusión de *Leucaena leucocephala* en la dieta de bovinos no influyó sobre la emisión de N₂O debido a la concentración de urea en el parche de orina al simular el sistema silvopastoril gramínea-leguminosa arbórea en la época de secas, en el trópico seco. No obstante, en los muestreos el mayor flujo de emisión de N₂O se relacionó con la mayor humedad del suelo debido al riego y con los días de aplicación de urea a través de la simulación del parche de orina.

En el estudio se generó información base sobre las emisiones de N₂O del suelo en un sistema silvopastoril gramínea-leguminosa debido a la concentración de urea en el parche de orina de bovino, en la época de estiaje en el trópico seco, con lo cual se obtuvo un precedente de la emisión local de N₂O, que permitirá obtener un factor de emisión local, ya que se ha demostrado que los valores por defecto que presenta el IPCC no son aproximaciones precisas, y que los inventarios de GEIs sólo incluyen emisiones de N₂O relacionadas a la vía de incorporación de N al suelo y no otros factores bióticos y abióticos, importantes dentro de las emisiones.

X. REFERENCIAS

Asociación Geoinnova. (2019). Fertilizantes con nitrógeno y sus impactos ambientales. Geoinnova. <https://geoinnova.org/blog-territorio/nitrogeno/> (15 de noviembre de 2019).

Baldock, J.A. y Skjemstad, J.O. (2000). Soil organic carbon/soil organic matter. In: Peverill, K. I., Sparrow, L. A., and Reuter, D. J. (eds.). Soil Analysis: An Interpretation Manual. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia. pp. 159- 170.

Banco Mundial. (2019). Emisiones de óxido ntrico (miles de toneladas métricas de equivalente de CO₂). Banco Mundial. Datos. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.NOXE.KT.CE?view=chart>

Berger B., L. (2011). Emisiones de óxido nítrico producidas por la actividad ganadera en el Uruguay en condiciones de pastoreo (p. 38). <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/1667/1/uy24-15490.pdf>

Broom, D. M., Galindo, F. A., y Murgueitio, E. (2013). Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 280(1771), 2013-2025.

Chapin, F. S., Matson, P. A., y Vitousek, P. M. (2002). Landscape Heterogeneity and Ecosystem Dynamics. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology, 369–397. doi:10.1007/978-1-4419-9504-9_13

Chen, X.B. y Gómez, M.J. (1992). Estimation of microbial protein supply to sheep and cattle based on urinary excretion of purine derivatives. An overview of the technical details. International Feed Research Unit. Rowett Research Institute, Aberdeen, UK. 21 p.

Cuellar, J., Salazar, E. y Dietz, J. (2015). Patrón de cambios del carbono almacenado en el ecosistema debido al cambio de uso del bosque tropical en la Cuenca de Aguaytía, Perú. Instituto Nacional de Innovación Agraria INIA. Lima Perú. 133p. (2) (PDF) *Patrón de cambios del carbono almacenado en el ecosistema debido al cambio de uso del bosque tropical en la Cuenca de Aguaytía, Perú.*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/286930910_Patron_de_cambios_del_carbono_al

macenado en el ecosistema debido al cambio de uso del bosque tropical en la Cuenca de Aguaytia Peru [accessed Oct 22 2021].

Curtin, D. y Campbell, C. A. (2008). Mineralizable nitrogen. In: Carter, M. R. and Gregorich, E. G. (eds.). Soil Sampling and Methods of Analysis. CRC. Boca Raton, FL. USA. pp. 599-606.

Dalal, R. C., Wang, W., Robertson, G. P., y Parton, W. J. (2003). Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation option: A review. Australian Journal of Soil Research, 41, 165-195.

De Klein, C.A.M., Pinares-Patiño, C.S. y Waghorn, G.C. (2008). Chapter 1. Greenhouse gas emissions. En: McDowell, R.W (ed.) Environmental Impacts of Pasturebased Farming. CAB International, Wallingford, UK, pp. 1-32

Domínguez, V., Irisarri, P., y Gonnet, S. (2007). Emisiones de óxido nitroso por suelos cultivados con arroz: Efecto de un inhibidor de la nitrificación. Agrociencia, XI, 50-57.

Durango, S., Gaviria, X., González, R., Sotelo, M., Gutierrez, J., Chirinda, N., Arango, J., y Barahona, R. (2017). Iniciativas de mitigación al cambio climático en sistemas de producción de carne bovina en países tropicales. CCAFS Info Note. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS), Copenhagen, Denmark. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/79950>

FAO, y IFA. (2001). Global estimates of gaseous emissions of NH₃, NO and N₂O from agricultural land. <http://www.fao.org/3/Y2780E/y2780e00.htm>

FAO. (2015). Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura. Un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo. FAO. <http://www.fao.org/3/a-i4260s.PDF>

FAO. (2018). Innovaciones en Producción Cárnica con Bajas Emisiones de Carbono. Experiencias y desafíos en ALC. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO. (2018). Soluciones ganaderas para el cambio climático. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/I8098ES/i8098es.pdf>

FAO. (2019). GLEAM 2.0 -Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y su potencial de mitigación. Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM). <http://www.fao.org/gleam/results/es/>

Gallego-Castro, L. A., Mahecha-Ledesma, L., y Angulo, J. (2014). Potencial forrajero de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) Gray en la producción de vacas lecheras. *Agronomía Mesoamericana*, 25(2), 393-403.

Gaviria, X., Rivera, J. E., y Barahona, R. (2015). Calidad nutricional y fraccionamiento de carbohidratos y proteína en los componentes forrajeros de un sistema silvopastoril intensivo. *Pastos y Forrajes*, 38, 194-201.

Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., y Tempio, G. (2013). Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería- Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <http://www.fao.org/3/a-i3437s.pdf>

Gogoi, B., y Baruah, K. K. (2011). Nitrous oxide emission from tea (*Camellia sinensis* (L.) O. kuntze)- planted soils of North East India and soil parameters associated with the emission. *Current Science*, 101, 531-536.

Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L. y Nelson, W. L. (1999). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. Sixth edition. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River. New Jersey, USA.

Illarze, G., del Pino, A., Riccetto, S., y Irisarri, P. (2018). Emisión de óxido nitroso, nitrificación, desnitrificación y mineralización de nitrógeno durante el cultivo del arroz en 2 suelos de Uruguay. *Revista Argentina de Microbiología*, 50(1), 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.05.004>

INECC. (2016, noviembre). Inventario Nacional de Emisiones y Compuestos de Gases de Efecto Invernadero. <http://www.cnog.org.mx/archivos/expo/INECC%20Inventario%20Nacional%20de%20Emisiones%20y%20Compuestos%20de%20Gases%20de%20Efecto%20Invernadero%20Ileana%20Villalobos%20Estrada.pdf>

IPCC. (1996). IPCC - Segunda evaluación Cambio Climático 1995. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/06/2nd-assessment-sp.pdf>

IPCC. (2001). Climate change 2001: The Scientific Basis. (J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, & C. A. Johnson, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGI_TAR_full_report.pdf

IPCC. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Capítulo 10: Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol.

IPCC. (2007). Climate change 2007. Synthesis report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (The Core Writing Team, R. K. Pachauri, & A. Reisinger, Eds.). WMO-UNEP.

IPCC. (2013). Cambio climático 2013 - La base de las ciencias físicas: Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: 10.1017 / CBO9781107415324

IPCC. (2019). Resumen para responsables de políticas. En: El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres [P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J.

Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)]. En prensa.

Jarvis, S. C., Stockdale, E. A., Shepherd, M. A. y Powlson, D. S. (1996). Nitrogen mineralizations in temperate agricultural soils: processes and measurement. *Advances in Agronomy*, 57, 187-235.

Jarvis, S.C., Scholefield, D. y Pain, B. (1995). Nitrogen cycling in grazing systems. In: Bacon, P.E. (Ed.), *Nitrogen Fertilization in the Environment*. Marcel Dekker, New York.

Jones, R.J. (1979). The value of *Leucaena leucocephala* as a feed for ruminants in the tropics. *World Animal Review* 31, 13-23.

Jones, S. K., Famulari, D., Di Marco, C. F., Nemitz, E., Skiba, U. M., Rees, R. M., y Sutton, M.A. (2011). Nitrous oxide emissions from managed grassland: a comparison of eddy covariance and static chamber measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(10), 2179–2194. <http://doi.org/10.5194/amt-4-2179-2011>

Li, J., Luo, J., Shi, Y., Houlbrooke, D., Wang, L., Lindsey, S., y Li, Y. (2015). Nitrogen gaseous emissions from farm effluent application to pastures and mitigation measures to reduce the emissions: A review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 58, 339-353. <https://doi.org/10.1080/00288233.2015.1028651>

Longoria, R., Carbajal, G., Mar, B. E., y Ruíz, L. G. (2009). Nitrous oxide flux in maize and wheat cropped soils in the central region of Mexico during “El Niño” year 1998. *Atmósfera*; Vol 16, No 4 (2003). <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8515/7985>

López, O., Lamela, L., Montejo, I.L., y Sánchez, T. (2015). Influencia de la suplementación con concentrado en la producción de leche de vacas Holstein x Cebú en silvopastoreo. *Pastos y Forrajes*, 38, 46-54.

Lynch, J. (2019). Availability of disaggregated greenhouse gas emissions from beef cattle production: A systematic review. *Environmental Impact Assessment Review*, 76, 69-78.

Machefert, S.E., Dise, N.B., Goulding, K.W.T. y Whitehead, P.G. (2002) Nitrous oxide emission from a range of land uses across Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6 (3), 325-337.

Mahecha, L., Escobar, J.P., Suárez, J.F., y Restrepo, L.F. (2007). *Tithonia diversifolia* (botón de oro) como suplemento forrajero de vacas F1 (Holstein x Cebú). *Livestock Research for Rural Development*, 1, 1-7. URL: <http://lrrd.cipav.org.co/lrrd19/2/mahe19016.htm>. Acceso mayo 2017.

Mengpin, G., Johannes, F. y Vigna, L. (2021). Cuatro gráficos que explican las emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector. Instituto de Recursos Mundiales (WRI, por sus siglas en inglés). <https://wrimexico.org/bloga/cuatro-gr%C3%A1ficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pa%C3%ADs-y-por>

México Gobierno de la República. (2014). Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162974/2015_indc_esp.pdf

Molina, I. C., Donney`s, G., Montoya, S., Rivera, J. E., Villegas, G., Chará, J. y Barahona, R. (2015). La inclusión de *Leucaena leucocephala* reduce la producción de metano de terneras Lucerna alimentadas con *Cynodon plectostachyus* y *Megathyrsus maximus*. *Livestock Research for Rural Development*. Volume 27, Article #96. Retrieved January 15, 2020, from <http://www.lrrd.org/lrrd27/5/moli27096.html>

Molina, I., Cantet, J. M., Montoya, S., Correa, G., y Barahona, R. (2013). Producción de metano in vitro de dos gramíneas tropicales solas y mezcladas con *Leucaena leucocephala* o *Gliricidia sepium*. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 8. <http://www.scielo.org.co/pdf/cmvez/v8n2/v8n2a02.pdf>

Muñoz, C. S., Sagar, P., Berben, D. Giltrap, y N. J. (2011). Influence Of Waiting Time After Insertion Of Base Chamber, 71, 610–614.

Murgueitio, E., Chará, J., Barahona R., R., Cuartas C., C., y Naranjo R., J. (2014). Los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPI), herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17, 501-507.

Murgueitio, E., Chará, J., Solarte, A., Uribe, F., Zapata, C., y Rievera, J. (2013). Agroforestería pecuaria y sistemas silvopastoriles intensivos (SSpi) para la adaptación ganadera al cambio climático con sostenibilidad. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 26, 313-316.

Murgueitio, E., Flores, M., Calle, Z., Chará, J., Barahona, R., Molina, C. H., y Uribe, F. (2015). Productividad en sistemas silvopastoriles intensivos en América Latina. En *Sistemas agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. Serie técnica. Informe técnico No. 42 (pp. 59-62). CIPAV.* https://www.researchgate.net/publication/277014127_PRODUCTIVIDAD_EN_SISTEMAS_SILVOPASTORILES_INTENSIVOS_EN_AMERICA_LATINA

Naranjo, J. F., Cuartas, C. A., Murgueitio, E., Chará, J., y Barahonna, R. (2012). Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. *Livestock Research for Rural Development*, 24. <http://www.lrrd.org/lrrd24/8/nara24150.htm>

Oenema, O. (2006). Nitrogen budgets and losses in livestock systems. *Greenhouse Gases and Animal Agriculture: An Update. Proceedings of the 2nd International Conference on Greenhouse Gases and Animal Agriculture, held in Zurich, Switzerland between 20 and 24 September 2005*, 1293, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.ics.2006.02.040>

Oenema, O., Velthof, G. L., Yamulki, S., y Jarvis, S. C. (1997). Nitrous oxide emissions from grazed grassland. *Soil Use and Management*, 13, 288-295.

Oenema, O., Wrage, N., Velthof, G.L., Van Groenigen, J.W., Dolfing, J. y Kuikman, P.J. (2005). Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 72, 51–65.

Ortega, R.L., Castillo, H.J.E. y Rivas, P.F.A. (2009). Conducta ingestiva de bovinos cebú adultos en leucaena manejada a dos alturas diferentes. *Técnica Pecuaria en México*. 47,125-134.

Petersen, S.O., Sommer, S.G., Aaes, O. y Soegaard, K. (1998). Ammonia losses from urine and dung of grazing cattle: effect of N intake. *Atmos. Environ.*, 32, 295-300.

Pierrehumbert, R. T., y Eshel, G. (2015). Climate impact of beef: An analysis considering multiple time scales and production methods without use of global warming potentials. *Environmental Research Letters*, 10(8), 085002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/085002>

Pinares-Patiño, C. S., Waghorn, G. C., Hegarty, R. S. y Hoskin, S. O. (2009) Effects of intensification of pastoral farming on greenhouse gas emissions in New Zealand, *New Zealand Veterinary Journal*, 57:5, 252-261, DOI: 10.1080/00480169.2009.58618

Pinos-Rodríguez, J. M., García-López, J. C., Peña-Avelino, L. Y., Rendón-Huerta, J. A., González-González, C., y Tristán-Patiño, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46, 359-370.

Pound, B; Martínez, C. L. (1983). *Leucaena: Its cultivation and use*. London, UK, Overseas Development Administration

Rivera, J. E., Molina, C. H., Molina, J. J., Chará, J., y Barahona, R. (2015). Determinación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de la orina y el estiércol bovino en dos sistemas de pastoreo orientados a la producción de leche. (P. Peri, Ed.; pp. 565-569). INTA. https://www.researchgate.net/publication/276206223_Determinacion_de_las_emisiones_de_gases_de_efecto_invernadero_GEI_provenientes_de_la_orina_y_el_estiercol_bovino_en_dos_sistemas_de_pastoreo_orientados_a_la_produccion_de_leche_Determination_of_green

Rivera, J., Chará, J., y Barahona, R. (2016). Análisis del ciclo de vida para la producción de leche bovina en un sistema silvopastoril intensivo y un sistema convencional en Colombia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 19, 231-251.

Rivera-Herrera, J. E., Molina-Botero, I., Chará-Orozco, J., Murgueitio-Restrepo, E., y Barahona-Rosales, R. (2017). Sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit: Alternativa productiva en el trópico ante el cambio climático. *Pastos y Forrajes*, 40, 171-183.

Rochette, P., y Janzen, H. H. (2005). Towards a revised coefficient for estimating N₂O emissions from legumes. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 73, 171-179.

Saggar, S., Andrew, R. M., Tate, K. R., Hedley, C. B., Rodda, N. J. y Townsend, J. A., (2004). Modelling nitrous oxide emissions from dairy grazed pastures. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68, 243-255.

Saggar, S., J. Luo, D.L. Giltrap, y M. Maddena. (2009). Nitrous oxide emissions from temperate grasslands: processes, measurements, modeling and mitigation. p. 1-66.

Salinas, Z., y Hernández, P. (2008). Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía. Serie Técnica, Manual Técnico No. 83. CATIE.

Selbie, D.R., Buckthought, L.E. y Shepherd, M.A. (2015). The challenge of the urine patch for managing nitrogen in grazed pasture systems. *Adv. Agron.*, 129, 229-292.

SEMARNAT-INECC. (2018). México-Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015 (INEGYCEI). <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/226>

Sparks, D. L. (Ed.). (1999). *Soil Physical Chemistry*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. y de Haan, C. (2009). *La larga sombra del ganado—Problemas ambientales y opciones*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Tan, K. M. 2003. Humic Matter in Soil and the Environment. Marcel Dekker, Inc, New York

Tierra. (2020). La ganadería y su contribución al cambio climático. Edit. Muñoz, A. octubre 2020. <https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2020/09/Informe-Ganaderia-Cambio-climatico-Amigos-de-la-Tierra.pdf>

Topps, J.H. y Elliot, R.C. (1997). Partition of nitrogen in the urine of African sheep given a variety of low-protein diets. *Animal Production*, 9, 219-227.

UNFCCC. (2019). Global Warming Potentials. United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/greenhouse-gas-data-unfccc/global-warming-potentials>

Villers, L., y López, J. (1995). Evaluación del uso agrícola y forestal del suelo en la cuenca del río Temascaltepec, Nevado de Toluca, México. *Investigaciones geográficas*, 31, 69-92.

Vistoso, E.M. (2015). Bases Técnicas Usadas para Medir N₂O en Suelos. CURSO: Investigación en Sistemas Ganaderos y Medición de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Whitehead, D.C. (1995). Grassland nitrogen. CAB International, Wallingford, UK, 397.

WMO. (2018). WMO Greengouse bulletin (GHG Bulletin)—No. 14: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2017. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5455

Zebarth, B. J., Dury, C. F., Tremlay, N. y Cambouris, A. N. (2009). Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review. *Soil Science Society of America Journal*, 89, 113-132.

Zumft, W. G. (1997). Cell biology and molecular basis of denitrification. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61, 533-616.

XI. GLOSARIO

GEI	Gases de Efecto Invernadero
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido nitroso
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
N	Nitrógeno
Gg de CO ₂ e /GtCO ₂	1000 toneladas de CO ₂
Mt CO ₂ eq	millones de toneladas de equivalentes de CO ₂ .
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
AFOLU	Agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra
SSP	Sistemas silvopastoriles
OMM	Organización Meteorológica Mundial
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
INEGyCEI	Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (United Nations Framework Convention on Climate Change)
NO	Ácido nítrico
PCG	Potencial de calentamiento global
NH ₃	Amoniaco
NH ₄ ⁺	Amonio
NO ₃ ⁻	Nitrato

O ₂	Oxígeno
pH	Potencial de hidrogeno
N ₂	Dinitrógeno
NO ₂ -	Nitrito
NH ₂ OH	Oxiamoniaco
kg	Kilogramo
m	Metro
ha	Hectárea
G	Gramos
MS	Materia seca
PC	Proteína cruda
PV	Peso vivo
mg	Miligramos
dL	Decilitro