

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“INVENTARIO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN  
EL ESTADO DE QUERÉTARO: SECTOR AGRÍCOLA”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO AMBIENTAL**

**PRESENTA**

**EDITH OBREGÓN MORALES**

**DIRIGIDA POR**

**M EN C. GUSTAVO PEDRAZA ABOYTES**

**SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2026**

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“INVENTARIO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN  
EL ESTADO DE QUERÉTARO: SECTOR AGRÍCOLA”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO AMBIENTAL**

**PRESENTA**

**EDITH OBREGÓN MORALES**

**DIRIGIDA POR**

**M EN C. GUSTAVO PEDRAZA ABOYTES**

**SINODALES**

**M. EN C. GUSTAVO PEDRAZA ABOYTES**  
DIRECTOR

---

**DR. JOSUÉ DANIEL GARCIA ESPINOZA**  
SINODAL

---

**M en C. CLAUDIA MÁRQUEZ ESTRADA**  
SINODAL

---

**DR. JULIO ARMANDO DE LIRA FLORES**  
SINODAL

---

Este trabajo es parte de un proyecto más amplio con nombre “Plan de acción ante el cambio climático del Estado de Querétaro” el cual fue financiado por fondos del CONACyT por medio del convenio 108173.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco el hecho de haber terminado una etapa importante en mi vida, y después de unos cuantos años, cerrar este bello ciclo con mi titulación en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro; la etapa que viví aquí fue una de las más hermosas que he pasado; doy gracias a los profesores, que, con su esfuerzo y voluntad, día a día me empaparon de sus conocimientos, tanto académicos, como de vida, convirtiéndose muchos de ellos en amigos míos. A los académicos que me acompañaron en este proceso, que sin ellos no sería posible. A mis padres, la oportunidad que me dieron de estudiar una carrera, su amor, apoyo incondicional, esfuerzo, dedicación, paciencia y grandes enseñanzas. Mi madre en sus cuidados y su extrema paciencia conmigo, a mi padre que es una persona que admiro, amo y extraño, él me enseñó la pasión que uno le tiene que poner uno a su propósito en esta vida. A mis hermanos que son un pilar importante para mí y a mi nana Carmen por tantos cuidados y amor.

A mis amigos que hice en la Facultad que son personas que ha dejado huella en mi vida. A los que aun después de años siguen, a los que se fueron, gracias. Cerrar mi titulación después de 16 años ha sido un proceso de aprendizaje emocional y de merecimiento más que académico. Estoy feliz de poder concretar y cerrar una etapa en la que me quede suspendida por mucho tiempo, y poderme abrir a más posibilidades. Estoy agradecida con todos y a cada uno de los que me brindaron presencia y amor en todo este camino, de saber quién soy y que busco de la vida. Soy privilegiada por poder ser lo que quiero ser y tener la capacidad de crecer con estructura, propósito, paciencia y amor en la vida.

Y a CONACyT y SEDESU por la oportunidad de brindarme este proyecto.

## ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1. Balance energético de la tierra y efecto invernadero	5
2.2. Gases de efecto invernadero	9
2.4. Papel de la agricultura en el cambio climático	17
2.5. Agricultura en el estado de Querétaro	20
2.6. Medidas de mitigación	23
3. HIPÓTESIS	25
4. OBJETIVOS	26
4.1. General	26
4.2. Específicos	26
5. METODOLOGÍA	27

5.1.	Quema en el campo de residuos agrícolas	27
5.1.1.	Fuentes de los datos	28
5.1.2.	Procedimiento	29
5.2.	Suelos agrícolas	34
5.2.1.	Fuentes de los datos	35
5.2.2.	Procedimiento	35
5.3.	Niveles de especificidad en las estimaciones de las emisiones.	53
5.4.	Calidad del Inventario y Nivel de Incertidumbre	54
6.	RESULTADOS	56
6.1.	Quema en el campo de residuos agrícolas	56
6.2.	Suelos Agrícolas	60
7.	DISCUSIÓN	81
8.	CONCLUSIONES	83
9.	BIBLIOGRAFÍA	85

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
Cuadro 1. Potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero (INE y SEMARNAT, 2006) (IPCC, 2007).....	10
Cuadro 2. Producción de cultivos en el estado de Querétaro 2024, Año Agrícola (OI + PV) (DGSIAP, 2025).....	22
Cuadro 3. Estadísticas seleccionadas de los residuos de los cultivos.....	29
Cuadro 4. Hoja de trabajo 4-4.1 de 3. Quema en el campo de residuos agrícolas..	30
Cuadro 5. Hoja 4-4. 2 de 3. Quema en el campo de los residuos agrícolas.....	32
Cuadro 6. Tasas de emisión por defecto para la realización de los cálculos de la quema de residuos agrícolas.....	33
Cuadro 7. Hoja 4-4. 3 de 3. Quema en el campo de los residuos agrícolas.....	34
Cuadro 8. Hoja 4-5. 1 de 5. Suelos agrícolas. Emisiones directas de óxido nitroso procedentes de los campos agrícolas, excluyendo histosoles. ....	36
Cuadro 9. Valores por defecto provisionales para el nitrógeno excretado por cabeza de animal por región <sup>a</sup> .....	37
Cuadro 10. Valores por defecto para el porcentaje de N en el estiércol producido con diferentes sistemas de manejo del estiércol en diferentes regiones del mundo.....	37
Cuadro 11. Hoja de trabajo 4-5 (adicional). Nitrógeno del estiércol utilizado como fertilizante .....	40
Cuadro 12. Resumen de los valores por defecto para los parámetros. <sup>a</sup> .....	41
Cuadro 13. Hoja de trabajo 4-5B (adicional) para calcular el aporte de nitrógeno correspondiente a los residuos de las cosechas .....	43
Cuadro 14. Resumen de los factores de emisión por defecto para las emisiones de N <sub>2</sub> O en la agricultura. ....	46
Cuadro 15. Hoja de trabajo 4-5. 2 de 5. Suelos agrícolas. ....	46
Cuadro 16. Hoja de trabajo 4-5. 3 de 5. Suelos agrícolas. ....	47

Cuadro 17. Hoja de trabajo 4-5. 4 de 5. Suelos agrícolas. ....	49
Cuadro 18. Hoja de trabajo 4-5. 5 de 5. Suelos Agrícolas.....	51
Cuadro 19. Valores por defecto de los parámetros para las emisiones indirectas.	53
Cuadro 20. Datos utilizados para calcular la excreción de N en el estiércol y los factores de emisión de N <sub>2</sub> O.....	53
Cuadro 21. HOJA 4-4.1 Quema en el campo de los residuos agrícolas.....	57
Cuadro 22. Hoja 4-4.2 Quema en el campo de los residuos agrícolas.....	58
Cuadro 23. HOJA 4-4.3 Quema en el campo de los residuos agrícolas.....	59
Cuadro 24. Cultivos principales y la cantidad total de fertilizantes nitrogenados ocupados en el estado de Querétaro (2006 Y 2023). (DGSIAP, 2025).....	60
Cuadro 25. Hoja 4-5.1 Emisiones directas de óxido nitroso de campos agrícolas .	61
Cuadro 26. Producción en el Estado de Querétaro por Tipo de Ganado (2006 Y 2023). ....	62
Cuadro 27. Hoja de trabajo 4-5 (Adicional). Nitrógeno del estiércol utilizado. ....	63
Cuadro 28. Producción de toneladas de cultivos en el estado de Querétaro, DGSIAP (2006 Y 2023). ....	64
Cuadro 29. Toneladas de cultivos fijadores y no fijadores, y biomasa seca en el estado de Querétaro y biomasa seca (2006 Y 2023). ....	65
Cuadro 30. Hoja 4-5B (Adicional) Entrada de N por residuos de cultivos.....	67
Cuadro 31. Hoja 4-5.2 Emisiones directas de óxido nitroso de histosoles.....	68
Cuadro 32. Hoja de trabajo 4-5.3 Emisiones de óxido nitroso del suelo procedente del pastoreo de animales en praderas y pastizales. ....	69
Cuadro 33. Hoja de trabajo 4-5.4 Emisiones indirectas procedentes de la deposición atmosférica de NH <sub>3</sub> y NO <sub>x</sub> .....	71
Cuadro 34. Hoja de trabajo 4-5.4 Emisiones indirectas de N <sub>2</sub> O procedentes de la lixiviación. ....	72
Cuadro 35. Emisiones en Gg de CO <sub>2</sub> equivalente de los suelos agrícolas en el estado de Querétaro.....	75
Cuadro 36. Emisiones en Gg de CO <sub>2</sub> equivalente proveniente de la quema de residuos agrícolas en el estado de Querétaro (2006 Y 2023). ....	79

Cuadro 37. Emisiones en Gg de CO <sub>2</sub> del sector agrícola en el estado de Querétaro (2006 Y 2023).....	80
---	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Esquema del funcionamiento del efecto invernadero en la tropósfera terrestre (Manahan, 2007).	7
Figura 2. Emisiones Directas de N <sub>2</sub> O del suelo agrícola del Estado de Querétaro 2006 y 2023.	76
Figura 3. Emisiones Indirectas de N <sub>2</sub> O del suelo agrícola del Estado de Querétaro 2006 y 2023.	77
Figura 4. Emisiones Indirectas de N <sub>2</sub> O del suelo agrícola del Estado de Querétaro 2006 y 2023	78

## RESUMEN

En el contexto del cambio climático y de los compromisos nacionales e internacionales de mitigación, resulta indispensable contar con inventarios actualizados de emisiones de gases de efecto invernadero a escala estatal. El presente trabajo tiene como objetivo elaborar y comparar el inventario de emisiones del sector agrícola del estado de Querétaro para los años 2006 y 2023, siguiendo las Directrices del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 1996), con el fin de analizar la evolución de las principales fuentes emisoras y generar información base para la toma de decisiones. El inventario considera las emisiones provenientes de los suelos agrícolas y de la quema en el campo de residuos agrícolas. Para ello, se utilizaron datos oficiales de producción agrícola y pecuaria, así como factores de emisión por defecto, aplicando una metodología de nivel 1. Los resultados indican que las emisiones totales del sector agrícola aumentaron de 2,273.21 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente en 2006 a 2,407.01 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente en 2023, lo que representa un incremento del 5.9 % en el periodo analizado. Los suelos agrícolas constituyen la principal fuente de emisiones en ambos años, debido principalmente a las emisiones directas e indirectas de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) asociadas al pastoreo de animales, manejo del estiércol, aplicación de fertilizantes nitrogenados y lixiviación del nitrógeno. Asimismo, aunque la quema de residuos agrícolas representa una fracción menor del total, sus emisiones prácticamente se duplicaron entre 2006 y 2023. El inventario elaborado permite identificar tendencias, fuentes prioritarias de mitigación y áreas de mejora en el manejo del nitrógeno, constituyéndose como una herramienta fundamental para el diseño de estrategias estatales de mitigación del cambio climático en el sector agrícola.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los principales problemas ambientales a escala global debido a sus efectos sobre los sistemas naturales, las actividades productivas y el bienestar humano. Este fenómeno se asocia principalmente con el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, derivado de actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo y ciertas prácticas agrícolas. Entre las alteraciones más relevantes se encuentran el incremento de la temperatura media global, la modificación de los patrones de precipitación y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos, los cuales generan impactos significativos en distintas regiones. La agricultura ocupa un lugar central en esta problemática, ya que es simultáneamente vulnerable a los efectos del cambio climático y una fuente importante de emisiones. Las prácticas agrícolas convencionales, basadas en el uso intensivo de fertilizantes sintéticos y la mecanización dependiente de combustibles fósiles, contribuyen a la emisión de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso. Asimismo, la productividad agrícola depende estrechamente de variables climáticas como la temperatura y la precipitación, lo que hace al sector especialmente sensible a la variabilidad climática. En México, particularmente en regiones con disponibilidad limitada de agua, los efectos del cambio climático se intensifican. La agricultura de temporal depende directamente de la precipitación, por lo que sequías prolongadas, lluvias intensas y otras anomalías climáticas representan riesgos constantes para la producción y la seguridad alimentaria, situación que se agrava por la degradación del suelo y la presión creciente sobre los recursos naturales.

En el estado de Querétaro, la agricultura ha sido históricamente una actividad relevante; sin embargo, el crecimiento urbano e industrial ha transformado el uso del suelo y reducido superficies agrícolas, lo que plantea desafíos en términos de sostenibilidad ambiental y manejo eficiente de recursos.

En este contexto, los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero constituyen herramientas fundamentales para cuantificar las emisiones por sector e identificar sus principales fuentes, permitiendo establecer una línea base para el diseño de estrategias de mitigación y adaptación acordes con las condiciones regionales. La presente investigación se justifica por la necesidad de examinar el papel de la agricultura en el contexto del cambio climático a escala estatal, considerando su contribución a las emisiones y su vulnerabilidad ante los impactos climáticos, con el propósito de aportar información técnica que apoye la planeación ambiental y la formulación de políticas públicas orientadas a un desarrollo más sostenible en Querétaro.

## 2. ANTECEDENTES

Históricamente, el ser humano ha adaptado sus actividades al entorno. Sin embargo, a partir de la Revolución Industrial, su estilo de vida se transformó de manera acelerada. El inicio del uso masivo de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural ha facilitado el trabajo y la obtención de alimento para el ser humano, permitiéndole alcanzar un nivel de confort antes inimaginable; por ejemplo, en la agricultura, un litro de petróleo equivale aproximadamente al trabajo de cien hombres laborando durante 24 horas.

El problema de los combustibles fósiles radica en que, al momento de quemarse, generan vapor de agua y dióxido de carbono, gases que siempre han existido de manera natural en la atmósfera; sin embargo, debido a su uso indiscriminado, se ha intensificado un fenómeno conocido como calentamiento global, consecuencia del efecto invernadero que provocan estos gases. Dicho fenómeno consiste en el incremento de la temperatura promedio mundial, lo que ha ocasionado la disminución de la capa de nieve en los polos y glaciares, la elevación del nivel del mar y la presencia de cambios meteorológicos inesperados o inusuales, como sequías e inundaciones, que se han presentado con mayor regularidad en los últimos años, causando pérdidas humanas y económicas significativas.

Por estas razones, se vio la necesidad de realizar, en primera instancia, un inventario de los gases de efecto invernadero que se producen, absorben y emiten en el estado de Querétaro, tomando como referencia las guías del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático y considerando como año base el 2006 y 2023. A partir de esta información, es posible conocer la situación de dichos gases y proponer medidas de mitigación ante las posibles consecuencias, así como recomendaciones orientadas a disminuir su generación (IPCC, 2006).

El cambio climático es un problema con características únicas, ya que es de naturaleza global, sus impactos más significativos se manifiestan en el largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales —fenómenos ecológicos y climáticos— y procesos sociales, económicos y políticos a escala

mundial. El clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja; es un estado cambiante de la atmósfera mediante sus interacciones con los océanos y los continentes, en diversas escalas de tiempo y espacio. Cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura se desvía de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos —como inestabilidades de la atmósfera y/o del océano— o externos, tales como cambios en la intensidad de la radiación solar absorbida o alteraciones del planeta derivadas de actividades humanas.

La Tierra absorbe radiación solar principalmente en la superficie y la redistribuye mediante circulaciones atmosféricas y oceánicas con el fin de compensar los contrastes térmicos, principalmente del ecuador hacia los polos. La energía recibida es reemitida al espacio para mantener, en el largo plazo, un balance energético; cualquier cambio en la radiación recibida o reemitida, o en su distribución sobre la superficie terrestre, se reflejará como cambios en el clima. A estas variaciones en la disponibilidad de energía radiativa se les denomina forzamientos radiativos; cuando estos son positivos, tienden a calentar la superficie de la Tierra (Fernández y Martínez, 2004).

El aumento en la concentración de gases de efecto invernadero reduce la eficiencia con la cual la Tierra reemite la energía recibida al espacio. Parte de la radiación saliente de onda larga emitida por la superficie es absorbida y reemitida hacia la misma por la presencia de estos gases, lo que provoca un incremento en la temperatura superficial. Aunque una fracción de la energía queda atrapada, suficiente energía logra escapar al espacio para alcanzar un nuevo equilibrio radiativo; sin embargo, si las concentraciones continúan aumentando, la temperatura superficial del planeta mantendrá una tendencia positiva. Aun cuando las emisiones se estabilicen, los efectos del calentamiento persistirán durante largos periodos debido a la permanencia prolongada de estos gases en la atmósfera.

Desde mediados del siglo XX, los modelos numéricos empleados para simular los procesos de circulación atmosférica han mejorado notablemente. La simulación y el pronóstico del clima se han convertido en objetivos primordiales de la investigación atmosférica. Diversos modelos y cálculos utilizados para estimar la concentración de gases de efecto invernadero han sido desarrollados por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (Fernández y Martínez, 2004; Seinfeld y Pandis, 2006).

## 2.1. Balance energético de la tierra y efecto invernadero

El Sol proporciona diariamente a la Tierra una enorme cantidad de energía. La Tierra elimina dicha energía a un ritmo similar al que la absorbe, lo que favorece que la temperatura media del planeta permanezca relativamente constante. La energía emitida por la Tierra se libera en forma de radiación electromagnética, aunque de manera distinta a como lo hace el Sol (Spiro y Stigliani, 2007).

La radiación emitida depende de la temperatura del cuerpo emisor en dos aspectos fundamentales: por un lado, la cantidad de radiación aumenta conforme se incrementa la temperatura y, por otro, la longitud de onda disminuye cuando la temperatura se eleva. En la atmósfera y el clima actúan dos tipos de radiación claramente distintos: la luz visible originada en el Sol y la radiación infrarroja emitida por la Tierra. La diferencia entre ambas se debe a la gran disparidad de temperaturas; el Sol emite radiación a aproximadamente 6 000 °C, mientras que los elementos terrestres —suelo, océanos, casquetes polares, capas atmosféricas y nubes— lo hacen a temperaturas cercanas a 0 °C. Por esta diferencia en la longitud de onda, la radiación solar se denomina de onda corta y la terrestre de onda larga, constituyendo espectros claramente diferenciados (Fernández y Martínez, 2004).

Debido a su distancia al Sol y a su albedo, entendido como la capacidad de reflejar la radiación que recibe, la Tierra debería presentar una temperatura característica de equilibrio conocida como temperatura efectiva. Si el planeta se encontrara más

alejado del Sol sería más frío, y si su superficie fuera más oscura o mate sería más cálido, ya que a mayor distancia se recibe menos radiación y los cuerpos más oscuros absorben una mayor cantidad de energía. La temperatura efectiva resulta del balance entre la radiación solar de onda corta absorbida por la Tierra y la radiación de onda larga emitida por ella misma. Considerando los valores del albedo planetario y la distancia al Sol, la temperatura efectiva de la Tierra sería de aproximadamente  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , valor muy distinto de la temperatura promedio real de su superficie, que es cercana a  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esta diferencia se explica por la presencia del efecto invernadero, fenómeno que ocurre en cualquier planeta o satélite natural que posea atmósfera.

Del total de la radiación solar incidente sobre la Tierra, cerca del 50 % alcanza la superficie y es absorbida por ella. Aproximadamente un 20 % es absorbido por los gases atmosféricos: la radiación ultravioleta por el ozono estratosférico y el oxígeno, y la radiación infrarroja por el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y las gotas de agua presentes en la atmósfera. El 30 % restante se refleja en las nubes, el hielo, la nieve, la arena y otros cuerpos reflectantes, regresando al espacio sin ser absorbido, como se muestra en la Figura 1 (Baird, 2001).

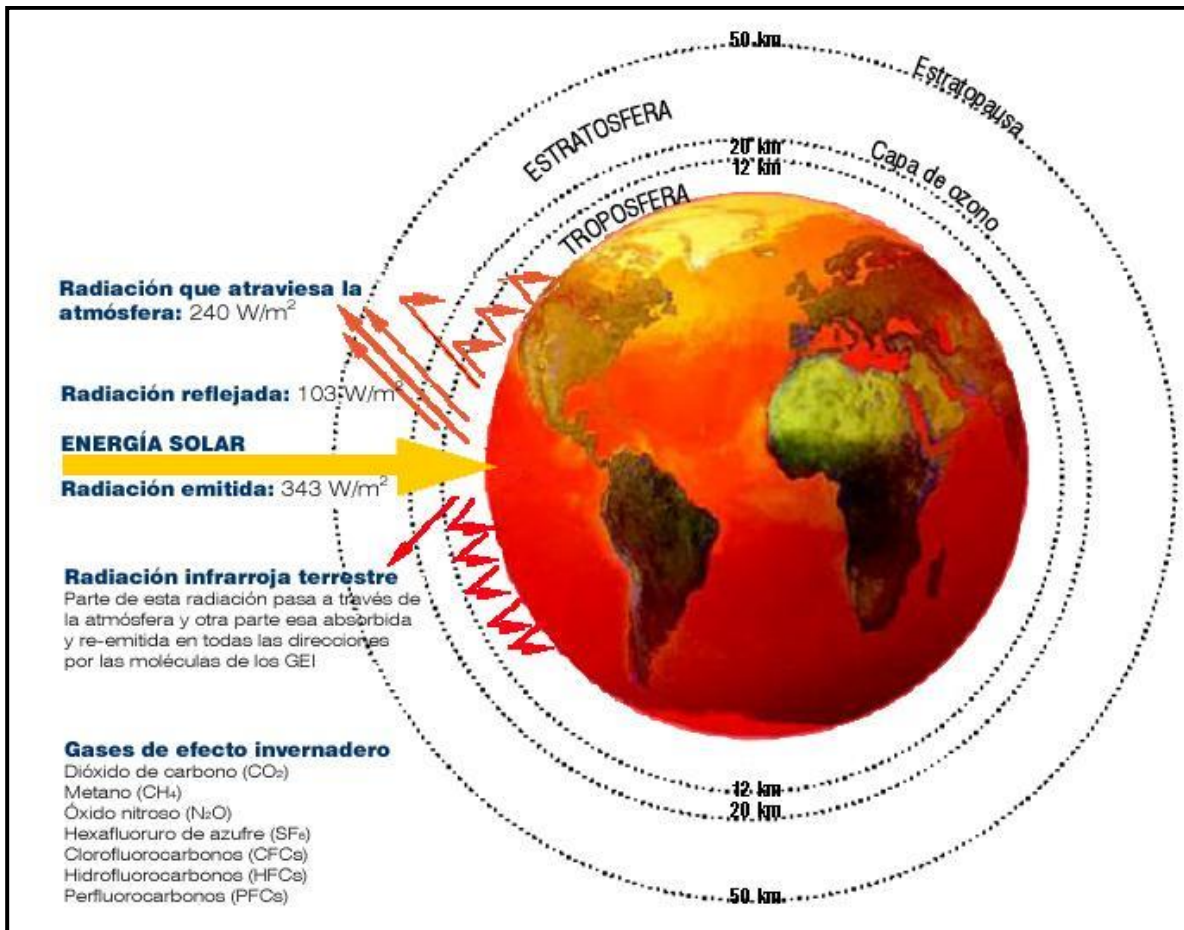


Figura 1. Esquema del funcionamiento del efecto invernadero en la troposfera terrestre (Manahan, 2007).

En el efecto invernadero, el aire resulta transparente a la radiación de onda corta y opaco a la radiación de onda larga, lo que indica que la atmósfera actúa como un filtro radiativo. La radiación solar atraviesa la atmósfera y es absorbida por la superficie terrestre y otros componentes, los cuales se calientan y emiten radiación infrarroja. Esta radiación es absorbida por la atmósfera y las nubes, que a su vez se calientan y reemiten energía tanto hacia arriba como hacia abajo. El resultado de este proceso es que la atmósfera cercana a la superficie es más cálida y la temperatura disminuye conforme se asciende en altura.

Este mecanismo se ve complementado por procesos termodinámicos no radiativos. En primer lugar, la convección atmosférica, mediante la cual el aire cercano a la superficie, al calentarse, se dilata, disminuye su densidad y asciende, mientras que el aire más frío de las capas superiores desciende, generando una mezcla vertical continua. En segundo lugar, el cambio de fase del agua, ya que el aire ascendente se enfría debido a la disminución de la presión y densidad atmosférica, lo que provoca la condensación del vapor de agua y la liberación de calor latente. El resultado neto de estos procesos es la disminución de la temperatura con la altura. Aunque el Sol es la fuente primaria de la energía térmica, la atmósfera se calienta principalmente desde la superficie hacia arriba. No toda la radiación solar incidente es absorbida debido al albedo planetario, ni toda la radiación terrestre es atrapada por la atmósfera, ya que una parte se libera al espacio; el efecto invernadero se produce por la fracción de radiación que sí es absorbida (Fernández y Martínez, 2004).

El término efecto invernadero proviene de su similitud con las estructuras utilizadas para el cultivo de plantas, en las cuales el techo permite el paso de la radiación solar, pero limita la salida de la radiación infrarroja generada en su interior, manteniendo así una temperatura más elevada que la del ambiente exterior (Fernández y Martínez, 2004).

Además, estudios recientes han demostrado que las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera han alcanzado niveles récord en la última década, intensificando el impacto del efecto invernadero sobre el balance energético de la Tierra. Datos recientes indican que las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) continúan incrementándose de forma sostenida respecto a los niveles preindustriales, lo que ha aumentado el forzamiento radiativo neto y contribuido al calentamiento global observado en el sistema climático terrestre (Organización Meteorológica Mundial, 2024).

Por su parte, evaluaciones científicas recientes señalan de manera inequívoca que las actividades humanas, en particular la quema de combustibles fósiles y los

cambios en el uso del suelo, han sido la causa dominante del aumento de la temperatura media global desde mediados del siglo XX. Este incremento altera el equilibrio entre la radiación solar absorbida por la Tierra y la radiación infrarroja emitida hacia el espacio, intensificando el efecto invernadero natural y generando impactos significativos en los sistemas climáticos, ecológicos y socioeconómicos a escala global (IPCC, 2023).

## 2.2. Gases de efecto invernadero

Se denomina gases de efecto invernadero a aquellos capaces de atrapar la radiación infrarroja que escapa de la superficie de la tierra hacia el espacio y transferirla, en forma de calor, al resto de los gases que forman la atmósfera. Esta capacidad depende de su estructura molecular y su tiempo de residencia en la atmósfera, antes de ser transformado en otro compuesto. Entre más compleja es su estructura y más grande su tiempo de residencia en la atmósfera, mayor es su potencial de calentamiento global siendo esta la capacidad que tienen los gases de detener la radiación de onda larga emitida por la tierra, por lo que cada uno tiene valores diferentes de PCG (Cuadro 1).

Cuadro 1. Potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero (INE y SEMARNAT, 2006) (IPCC, 2007).

Especie*	Fórmula química	Potencial de Calentamiento Global
Bióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	21
Oxido nitroso	N <sub>2</sub> O	310
HFC-23	CHF <sub>3</sub>	11,700
HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	650
HFC-125	C <sub>2</sub> HF <sub>5</sub>	2,800
HFC-134	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	1,000
HFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	1,300
HFC-152a	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> F <sub>2</sub>	140
HFC-143a	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	3,800
Hexafluoruro de azufre	SF <sub>6</sub>	23,900
Perfluorometano	CF <sub>4</sub>	6,500
Perfluoroetano	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	9,200

Los gases de efecto invernadero se clasifican en gases de efecto directo e indirecto. Los gases de efecto indirecto son aquellos que tienen la capacidad de influir en la concentración atmosférica de otros gases de efecto invernadero; un ejemplo es el ozono, el cual, además de su carácter oxidante en la atmósfera baja, puede atrapar radiación infrarroja y filtrar la radiación ultravioleta. Los gases de efecto invernadero directo incluyen el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y los halocarbonos. Dentro de este último grupo se encuentran los clorofluorocarbonos, como el freón (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), uno de los gases regulados por el Protocolo de Montreal debido a sus efectos sobre la capa de ozono estratosférico, así como los compuestos diseñados para sustituirlos, como los hidroclorofluorocarbonos, que son gases refrigerantes de segunda generación,

compuestos por hidrógeno, cloro, flúor y carbono, entre ellos el diclorofluorometano HCFC-21.

Un aspecto relevante en el estudio de los gases de efecto invernadero y su interacción con la atmósfera es el reconocimiento del trabajo científico que ha permitido comprender sus efectos a escala global. En este sentido, en 1995 se otorgó el Premio Nobel de Química a Mario Molina, Frank Sherwood Rowland y Paul J. Crutzen por sus investigaciones en química atmosférica, particularmente sobre los procesos de formación y descomposición del ozono. El trabajo de Molina y Rowland demostró que los clorofluorocarbonos liberados por actividades humanas pueden alcanzar la estratósfera y provocar la destrucción de la capa de ozono, evidenciando por primera vez el impacto directo de compuestos antropogénicos en procesos atmosféricos globales. Estos hallazgos sentaron bases científicas fundamentales para la regulación internacional de dichas sustancias y contribuyeron significativamente al entendimiento de la relación entre emisiones químicas y cambio climático (Molina y Rowland, 1974; Crutzen, 1970; Nobel Foundation, 1995).

Por su parte, los compuestos de efecto invernadero indirecto incluyen los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el monóxido de carbono (CO), el bióxido de azufre y los compuestos orgánicos volátiles excluyendo el metano (COVNM). Estos últimos actúan como precursores del ozono y deben ser regulados especialmente en zonas urbanas, con el fin de controlar la formación de ozono troposférico y de partículas suspendidas. Únicamente a los gases de efecto invernadero directo se les puede asignar un potencial de calentamiento global (PCG), ya que la formación de ozono a partir de sus precursores no presenta una relación lineal que permita establecer un factor de conversión.

El valor del PCG varía según el horizonte temporal considerado para la comparación; el acuerdo internacional establece el uso de un escenario de 100 años. El compuesto de referencia es el bióxido de carbono, y el PCG indica a cuántos gramos de CO<sub>2</sub> equivale un gramo de otro gas. Una vez convertidas las emisiones de los diferentes gases y sectores en emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>

mediante el uso de los PCG, es posible comparar la contribución relativa de cada gas y de cada sector. Esta comparación resulta fundamental, ya que permite establecer grados de responsabilidad y constituye el primer paso para la identificación de opciones de reducción de emisiones (Fernández y Martínez, 2004; Dickson, 2005).

En las últimas décadas, las concentraciones atmosféricas de los principales gases de efecto invernadero han mostrado un incremento sostenido como resultado de actividades antropogénicas, particularmente la quema de combustibles fósiles, los cambios en el uso del suelo y determinadas prácticas agrícolas e industriales. El dióxido de carbono representa la mayor proporción de las emisiones globales debido a su abundancia y a su prolongado tiempo de residencia en la atmósfera, mientras que el metano y el óxido nitroso, aunque se emiten en menores cantidades, presentan un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el del CO<sub>2</sub> en horizontes temporales equivalentes (IPCC, 2023).

El comportamiento atmosférico de los gases de efecto invernadero está estrechamente relacionado con sus fuentes de emisión y con los procesos físicos y químicos que determinan su permanencia y transformación en la atmósfera. Por ejemplo, el metano proviene principalmente de actividades agropecuarias, manejo de residuos y procesos energéticos, mientras que el óxido nitroso se asocia principalmente con el uso de fertilizantes nitrogenados y procesos industriales. Estos gases contribuyen de manera diferenciada al forzamiento radiativo, influyendo en la intensidad del efecto invernadero y en la variabilidad climática a escala regional y global (EPA, 2022; IPCC, 2021).

La cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero en términos de dióxido de carbono equivalente constituye una herramienta fundamental para el análisis comparativo y la formulación de políticas públicas orientadas a la mitigación del cambio climático. Al expresar las emisiones de distintos gases en una unidad común, es posible identificar los sectores con mayor contribución relativa, establecer prioridades de intervención y evaluar la eficacia de las estrategias de reducción de emisiones. Este enfoque ha sido adoptado ampliamente en

inventarios nacionales y regionales de emisiones como base para el diseño de programas de mitigación y adaptación al cambio climático (SEMARNAT, 2022; IPCC, 2023)

### 2.3. Reacción ante el cambio

En 1992 se estableció la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con el objetivo de lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Para octubre de 1998, 176 países habían firmado la Convención. No obstante, este instrumento internacional no especificó objetivos concretos de concentración de gases de efecto invernadero ni niveles obligatorios de reducción de emisiones.

Con el fin de avanzar hacia compromisos más específicos, se llevaron a cabo diversas conferencias internacionales, entre ellas la Conferencia de Ginebra en 1996, la Conferencia de Kyoto en 1997, la Conferencia de Buenos Aires en 1998 y la Conferencia de Bonn en 1999, cuyo propósito fue establecer metas más claras y mecanismos de cumplimiento.

En la Conferencia de Kyoto se alcanzó un primer acuerdo internacional vinculante (Bolin, 1998), mediante el cual treinta y ocho países, principalmente naciones desarrolladas de América del Norte, Europa, Asia y Australia, se comprometieron a reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), en un rango de entre 5 % y 8 % por debajo de los niveles registrados en 1990. En el caso de Estados Unidos, los negociadores se comprometieron a una reducción del 7 %.

El Protocolo de Kyoto estableció que cada país participante debía demostrar avances para el año 2005 y lograr las reducciones de emisiones durante el periodo comprendido entre 2008 y 2012. Además de las reducciones directas, el tratado reconoció las compensaciones mediante el fortalecimiento de los sumideros de gases de efecto invernadero.

La agricultura, considerando una definición amplia que incluye pastizales y sistemas forestales, es reconocida en el Protocolo tanto como fuente emisora como receptora de gases de efecto invernadero. El Anexo A3.5 de las Directrices del IPCC de 1996, identifica como principales fuentes de emisiones agrícolas la fermentación entérica, el manejo del estiércol, el cultivo de arroz, la gestión del suelo agrícola, la quema de residuos en campo y la deforestación. Asimismo, se reconocen como sumideros las actividades de forestación y reforestación, mientras que otras fuentes y sumideros continúan siendo objeto de estudio (Schneider, 2000).

Ante la detección del problema del cambio climático global, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon en 1988 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change), un organismo abierto a todos los Estados miembros de las Naciones Unidas y de la Organización Meteorológica Mundial.

La función del IPCC consiste en analizar de manera exhaustiva, objetiva, abierta y transparente la información científica, técnica y socioeconómica relevante para comprender los riesgos asociados al cambio climático inducido por actividades humanas, sus posibles impactos y las opciones de adaptación y mitigación. El IPCC no realiza investigaciones propias ni monitorea directamente variables climáticas, sino que fundamenta sus evaluaciones en la literatura científica y técnica revisada por pares y publicada.

Una de las principales actividades del IPCC es la elaboración periódica de evaluaciones integrales del conocimiento sobre el cambio climático. Asimismo, produce informes especiales y documentos técnicos sobre temas específicos cuando se considera necesario contar con asesoramiento científico independiente, y apoya a la CMNUCC mediante el desarrollo de metodologías para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

El IPCC se estructura en tres Grupos de Trabajo y un Equipo Especial:

- El Grupo de Trabajo I evalúa los aspectos científicos del sistema climático y del cambio climático.
- El Grupo de Trabajo II analiza la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos y naturales, los impactos del cambio climático y las opciones de adaptación.
- El Grupo de Trabajo III evalúa las posibilidades de mitigación mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- El Equipo Especial sobre Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero es responsable del Programa del IPCC sobre inventarios nacionales (IPCC, 2010).

En México, un primer esfuerzo para la construcción de escenarios sobre los posibles efectos del cambio climático fue el proyecto *Estudio de país: México ante el cambio climático*, realizado durante la primera mitad de la década pasada. Los documentos derivados de este estudio ofrecen una visión panorámica a escala nacional. Desde entonces, se han desarrollado dos líneas principales de investigación: por un lado, el fortalecimiento de los estudios de alcance nacional y, por otro, el incremento de investigaciones puntuales y sectoriales.

Entre los primeros destacan las Comunicaciones Nacionales presentadas por el Gobierno Federal ante la CMNUCC y la elaboración de una Estrategia Nacional de Cambio Climático. En contraste, los estudios a escala intermedia, correspondiente al ámbito estatal, han sido menos frecuentes. Sin embargo, el tamaño y la posición

de los estados dentro de los niveles de gobierno los convierten en una escala adecuada para implementar medidas de mitigación de emisiones y políticas eficaces de adaptación al cambio climático (Martínez y Conde, 2008).

Este contexto justifica la elaboración de los Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC). En 2006, el Instituto Nacional de Ecología, órgano desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, encomendó por primera vez a una entidad federativa la elaboración de un PEACC, iniciando los trabajos correspondientes en el estado de Veracruz. Posteriormente, el estado de Nuevo León emprendió un proceso similar. En este marco, el estado de Querétaro se incorporará al PEACC mediante la elaboración de un inventario de gases de efecto invernadero, del cual forma parte el presente trabajo.

La evidencia científica más reciente confirma que el calentamiento observado del sistema climático es inequívocamente atribuible a las actividades humanas, principalmente a través del incremento sostenido de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero. Desde 2019, las concentraciones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso han alcanzado niveles sin precedentes en al menos los últimos 800 000 años, generando un forzamiento radiativo positivo que impulsa el aumento de la temperatura media global, el deshielo acelerado y la intensificación de eventos climáticos extremos (IPCC y col., 2021; IPCC, 2023).

El sector agropecuario desempeña un papel central en la dinámica del cambio climático, ya que es responsable de una proporción significativa de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, particularmente de metano y óxido nitroso, derivados de la fermentación entérica, el manejo de estiércol y el uso de fertilizantes nitrogenados. Al mismo tiempo, este sector es altamente vulnerable a los impactos climáticos, como el incremento en la variabilidad de las lluvias, las sequías prolongadas y las olas de calor, lo que afecta la productividad agrícola y la seguridad alimentaria, especialmente en regiones rurales y de bajos ingresos (FAO, 2022; Smith y col., 2021).

En el caso de México, los escenarios climáticos recientes proyectan incrementos de temperatura superiores al promedio global y una disminución de la precipitación en amplias zonas del territorio nacional, particularmente en el centro y norte del país. Estas condiciones incrementan el riesgo climático para actividades productivas estratégicas como la agricultura y la ganadería. En este contexto, la elaboración de inventarios de gases de efecto invernadero a escala estatal y regional se reconoce como un instrumento clave para el diseño de políticas públicas de mitigación y adaptación, al permitir identificar fuentes prioritarias de emisión y evaluar la efectividad de las medidas implementadas (INECC, 2022; SEMARNAT y col., 2021).

#### 2.4. Papel de la agricultura en el cambio climático

Desde la existencia del ser humano ha existido la necesidad de alimentarse. Durante aproximadamente 180 mil años, las poblaciones humanas fueron nómadas, desplazándose en busca de alimentos, hasta que comenzaron a asentarse en zonas cercanas a ríos, mares y arroyos, donde convergían los elementos naturales necesarios para la subsistencia. Hace alrededor de 10 mil años, el ser humano aprendió a cultivar la tierra, lo que dio origen a los primeros excedentes alimentarios y permitió el surgimiento de grandes ciudades y civilizaciones. Con el tiempo, se desarrollaron diversas técnicas de cultivo adaptadas a distintos tipos de suelos y climas. La agricultura ha requerido históricamente un esfuerzo considerable, por lo que inicialmente se incorporó el uso de animales de tiro y, posteriormente, maquinaria agrícola que demanda el uso de combustibles fósiles. Este proceso facilitó la producción de alimentos y generó excedentes destinados, entre otros fines, a la ganadería y a la producción de agrocombustibles. Como consecuencia del aumento en la demanda de alimentos, se han cultivado grandes extensiones de tierra, de tal manera que cerca del 70 % del agua consumida por la humanidad se destina actualmente a la agricultura.

Estas extensiones, aunadas al predominio de monocultivos, favorecen la proliferación de plagas, lo que condujo al desarrollo y uso de pesticidas. Dichos compuestos afectan el equilibrio natural, ya que pueden depositarse en distintos compartimentos ambientales, como el suelo, el aire, el agua y la biota. De manera paralela, se desarrollaron fertilizantes sintéticos derivados del petróleo, los cuales incrementaron significativamente el rendimiento de los cultivos.

El impacto del desarrollo de la agricultura y de las prácticas agrícolas sobre las emisiones de gases de efecto invernadero ha sido ampliamente evaluado en el contexto del cambio climático. En conjunto, se estima que estas actividades contribuyen aproximadamente con el 25 %, 65 % y 90 % del total de las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, respectivamente (Duxbury y col., 1993). Asimismo, la agricultura representa una fuente importante de emisiones globales de NH<sub>3</sub>, CO y NO. Durante los últimos 150 años, las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> asociadas al cambio de uso de suelo con fines agrícolas han sido comparables a las derivadas de la combustión de combustibles fósiles; sin embargo, esta última constituye actualmente la principal fuente de CO<sub>2</sub> y se prevé que continúe siendo dominante en el futuro. Los principales aportes agrícolas de CH<sub>4</sub> provienen de los animales rumiantes, los arrozales y la quema de biomasa, mientras que la capacidad de los suelos aeróbicos para oxidar CH<sub>4</sub> ha disminuido debido a las alteraciones en los ciclos naturales del nitrógeno. Las emisiones de N<sub>2</sub>O provenientes de la agricultura han sido probablemente subestimadas, como resultado de análisis incompletos del incremento de los flujos de nitrógeno en el ambiente, particularmente a través de la volatilización de NH<sub>3</sub> del estiércol animal, la lixiviación de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y el aumento en el uso de la fijación biológica de nitrógeno (Duxbury, 1994).

La contribución de la agricultura al cambio climático ha sido analizada utilizando datos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), considerando escenarios en los que el potencial de calentamiento global del CH<sub>4</sub> y las emisiones agrícolas de N<sub>2</sub>O se duplican. Bajo estas condiciones, se estima que

la agricultura, incluyendo el cambio de uso de suelo, aporta entre el 28 % y el 33 % del cambio climático proyectado para los próximos 100 años, a partir de las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O existentes en 1900. Los análisis de las fuentes agrícolas responsables de este impacto indican que cerca del 80 % se asocian con la agricultura tropical y que aproximadamente dos terceras partes provienen de fuentes no relacionadas directamente con el suelo. La importancia relativa de la agricultura en la generación del cambio climático varía significativamente entre países, como se observa en comparaciones entre Estados Unidos, India y Brasil. No obstante, estos análisis presentan limitaciones, entre las que se incluyen evaluaciones insuficientes de los balances netos de gases de efecto invernadero en los agroecosistemas, incertidumbres en los flujos globales de estos gases y una comprensión incompleta de los procesos químicos en la troposfera (Duxbury, 1994).

En la actualidad, la agricultura es reconocida no sólo como una fuente relevante de emisiones de gases de efecto invernadero, sino también como un sector con alto potencial para contribuir a su mitigación. Prácticas como la agricultura de conservación, el manejo integrado de nutrientes, la reducción del laboreo y la incorporación de residuos orgánicos al suelo pueden incrementar el secuestro de carbono y reducir las emisiones de óxido nitroso. Diversos estudios recientes señalan que la adopción de estas prácticas puede mejorar la resiliencia de los agroecosistemas frente al cambio climático, al tiempo que se mantiene o incrementa la productividad agrícola (Smith y col., 2021; Paustian y col., 2022).

El cambio de uso de suelo asociado a la expansión agrícola continúa siendo uno de los principales factores que incrementan las emisiones de dióxido de carbono a nivel global. La conversión de bosques, selvas y pastizales naturales en tierras de cultivo o áreas de pastoreo reduce significativamente las reservas de carbono almacenadas en la biomasa y en el suelo. De acuerdo con evaluaciones recientes, la reducción de la deforestación y la restauración de tierras degradadas representan estrategias clave para mitigar el cambio climático, especialmente en

regiones tropicales donde la agricultura extensiva sigue siendo un motor dominante del cambio de uso de suelo (IPCC y col., 2021; Griscom y col., 2020).

Asimismo, la intensificación sostenible de la producción agrícola se plantea como una vía fundamental para enfrentar simultáneamente los desafíos del cambio climático y la seguridad alimentaria. Este enfoque busca aumentar la producción de alimentos sin expandir la frontera agrícola ni incrementar proporcionalmente las emisiones de gases de efecto invernadero. Organismos internacionales destacan que la integración de políticas climáticas en el sector agrícola, junto con incentivos económicos y marcos regulatorios adecuados, es esencial para reducir las emisiones, fortalecer la adaptación al cambio climático y garantizar sistemas alimentarios sostenibles a largo plazo (FAO, 2022; HLPE, 2020).

## 2.5. Agricultura en el estado de Querétaro

El estado de Querétaro es uno de los estados con menor extensión territorial del país; sin embargo, históricamente se ha dedicado a la agricultura debido a las condiciones climáticas y geográficas que presenta. En los últimos años, la producción agrícola se ha incrementado como resultado de la incorporación de mejoras tecnológicas; no obstante, de manera paralela, la industria ha ganado terreno sobre el sector agrícola, de tal forma que superficies que anteriormente se destinaban al cultivo han sido transformadas en parques industriales.

En el estado de Querétaro, la superficie dedicada a las actividades agrícolas se encuentra subdividida en cuatro distritos de desarrollo rural, los cuales corresponden a las regiones delimitadas por las dependencias del sector agropecuario con base en la similitud de las características de los municipios, lo que resulta fundamental para la adecuada planeación e impulso del sector. La región Jalpan comprende dos áreas diferenciadas: una zona montañosa con predominio de actividad forestal y una zona de trópico seco con actividad agropecuaria de mediano potencial productivo. La región Cadereyta presenta un

bajo potencial productivo tanto en condiciones de temporal como de riego, aunque destaca una agricultura más desarrollada en el municipio de Colón. La región San Juan del Río es la más productiva del estado y, en general, cuenta con mejor infraestructura de apoyo, como carreteras, presas, maquinaria agrícola, organizaciones de productores y centros de consumo y comercialización. Por su parte, la región Querétaro presenta un bajo potencial productivo en temporal y un nivel intermedio avanzado en condiciones de riego (SEDESU, 2010).

En el estado de Querétaro, la producción agrícola se concentra principalmente en cultivos básicos como maíz, frijol, sorgo y avena, tal como se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Producción de cultivos en el estado de Querétaro 2024, Año Agrícola (OI + PV) (DGSIA, 2025).

	Cultivo	Superficie (ha)		Valor Producción (miles de Pesos)
		Sembrada	Cosechada	
1	Ajo	55.00	55.00	18,749.52
2	Arvejión	12.00	12.00	72.42
3	Avena forrajera en verde	4,553.55	4,553.55	76,428.19
4	Brócoli	580.00	580.00	41,402.74
5	Cacahuate	2.00	2.00	48.00
6	Calabacita	51.50	51.50	5,073.20
7	Camote	4.00	4.00	188.00
8	Cebada grano	2,330.00	2,330.00	87,240.63
9	Cebolla	337.60	337.60	54,871.00
10	Chile verde	761.68	761.68	626,243.27
11	Coliflor	277.00	277.00	27,651.72
12	Elote	218.00	218.00	17,586.59
13	Frijol	3,533.64	2,219.64	33,571.50
14	Garbanzo forrajero	34.00	34.00	91.75
15	Garbanzo grano	43.00	43.00	1,907.57
16	Hongos, setas y champiñones	8.10	8.10	9,559.62
17	Jícama	16.00	16.00	1,863.68
18	Lechuga	764.00	764.00	111,939.01
19	Maíz forrajero en verde	12,638.35	12,638.35	776,470.41
20	Maíz grano	72,539.55	69,039.55	1,238,215.71
21	Pastos y praderas	413.80	413.80	6,074.65
22	Pepino	50.02	50.02	176,234.70
23	Sorgo forrajero en verde	149.90	149.90	5,880.26
24	Sorgo grano	237.57	237.57	10,113.66
25	Tomate rojo (jitomate)	293.38	293.38	854,258.76
26	Tomate verde	545.87	545.87	97,792.94
27	Trigo grano	636.00	636.00	24,550.39
28	Triticale forrajero en verde	1,438.00	1,438.00	31,574.19
29	Zanahoria	200.00	200.00	19,635.22
<b>Total</b>		<b>102,723.51</b>	<b>97,909.51</b>	<b>4,355,289.28</b>

## 2.6. Medidas de mitigación

El enfoque tecnológico para la mitigación de los gases de efecto invernadero provenientes de la agricultura, probablemente se centrará en CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, porque las emisiones de CO<sub>2</sub> son esencialmente relacionados con el tema socio-político de la deforestación tropical. Tecnologías disponibles incluyen los diversos medios de mejorar la fertilización nitrogenada de gestión para reducir las emisiones de N<sub>2</sub>O. El aumento de almacenamiento de carbono en la materia orgánica del suelo no se considera viable debido a las tasas de acumulación lenta y conceptos erróneos acerca de las pérdidas de materia orgánica de los suelos agrícolas (Duxbury, 1994).

Entre las principales medidas de mitigación de gases de efecto invernadero en el sector agrícola se encuentran aquellas orientadas a mejorar la eficiencia en el uso de insumos y a reducir las emisiones directas de metano y óxido nitroso. La optimización del manejo del nitrógeno mediante la aplicación precisa de fertilizantes, el uso de inhibidores de la nitrificación y la adopción de prácticas de agricultura de conservación permiten disminuir significativamente las emisiones de N<sub>2</sub>O, al tiempo que mejoran la productividad de los cultivos y reducen las pérdidas económicas asociadas al uso excesivo de fertilizantes sintéticos (FAO, 2022; Smith y col., 2021).

Los sistemas agroforestales representan una estrategia integral de mitigación y adaptación al cambio climático, ya que combinan la producción agrícola con la presencia de árboles y arbustos, lo que favorece la captura y el almacenamiento de carbono tanto en la biomasa aérea como en el suelo. Estos sistemas contribuyen a reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero, mejoran la fertilidad del suelo, regulan el microclima y aumentan la resiliencia de los agroecosistemas frente a eventos climáticos extremos como sequías y olas de calor, especialmente en regiones semiáridas y tropicales (IPCC, 2022; Nair y col., 2021).

Adicionalmente, la implementación de sistemas agroforestales y silvopastoriles permite disminuir la presión sobre los ecosistemas naturales al reducir la necesidad de expansión de la frontera agrícola y la deforestación asociada. Estos sistemas facilitan una producción más sostenible al integrar prácticas tradicionales con enfoques modernos de manejo del paisaje, generando beneficios ambientales, sociales y económicos. Diversos estudios recientes destacan que los sistemas agroforestales pueden desempeñar un papel clave en las estrategias nacionales y subnacionales de mitigación, al contribuir simultáneamente a la reducción de emisiones, la seguridad alimentaria y el desarrollo rural sostenible (FAO y col., 2021; IPCC, 2023).

En el estado de Querétaro, las medidas de mitigación en el sector agrícola adquieren particular relevancia debido a la predominancia de sistemas de temporal, la variabilidad climática y la presión creciente sobre los recursos suelo y agua. La adopción de prácticas como el manejo eficiente de fertilizantes nitrogenados, la incorporación de sistemas agroforestales y silvopastoriles, así como la conservación de la cobertura vegetal, representa una oportunidad estratégica para reducir las emisiones de óxido nitroso y metano, al tiempo que se incrementa la resiliencia de los sistemas productivos frente a sequías y temperaturas extremas. Estas acciones son consistentes con los lineamientos estatales de mitigación y con los inventarios recientes de emisiones, los cuales identifican al sector agropecuario como un componente clave para el cumplimiento de las metas climáticas a nivel estatal y nacional (SEDESU, 2023; INECC, 2022).

### 3. HIPÓTESIS

La aplicación de la metodología del IPCC para la elaboración del inventario de gases de efecto invernadero en el sector agrícola del estado de Querétaro permite identificar cambios significativos en las emisiones entre 2006 y 2023, evidenciando que los suelos agrícolas representan la principal fuente emisora y constituyen el área prioritaria para la implementación de medidas de mitigación.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. General

Elaborar un inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector agrícola en el estado de Querétaro, mediante la aplicación de las directrices del IPCC (2006), utilizando información oficial correspondiente a los años 2006 y 2023, con el fin de analizar comparativamente la evolución y comportamiento de dichas emisiones.

### 4.2. Específicos

- Identificar, estimar y cuantificar las emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y NO<sub>x</sub> generadas por la quema en campo de residuos agrícolas, conforme a factores de emisión reconocidos.
- Estimar las emisiones directas de N<sub>2</sub>O provenientes de suelos agrícolas (incluyendo manejo de estiércol y fertilización nitrogenada), así como las emisiones indirectas asociadas a la volatilización y lixiviación del nitrógeno aplicado.
- Analizar la variación de las emisiones entre 2006 y 2023, identificando las principales fuentes, tendencias y cambios en las prácticas agrícolas del estado.
- Evaluar la contribución del sector agrícola dentro del inventario estatal de GEI, considerando su relevancia frente a otros sectores.
- Proponer medidas de mitigación basadas en los resultados obtenidos, orientadas a la reducción de emisiones en el sector agrícola del estado de Querétaro.

## 5. METODOLOGÍA

En el módulo agricultura se consideran las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de estas fuentes:

- Cultivo del arroz: arrozales anegados. Se excluyó la categoría de cultivo de arroz en arrozales anegados, ya que este producto no se cultiva en el estado.
- Quema pre-escrita de sabanas. (Este tipo de vegetación no existe en el estado)
- Quema en el campo de residuos agrícolas
- Suelos agrícolas

La metodología fue diseñada para hacer inventarios nacionales (IPCC, 1996), pero en este caso se aplica para el estado, ya que, en México, cada estado pretende hacer su propio inventario y que sea comparable con los inventarios nacionales que ya existen.

### 5.1. Quema en el campo de residuos agrícolas

Los sistemas agrícolas de todo el mundo producen grandes cantidades de desperdicios agrícolas. La quema de los residuos en los campos es una práctica común, sobre todo en los países en desarrollo. Se estima que el porcentaje de los residuos de las cosechas quemados en los campos podría alcanzar el 40% en los países desarrollados. Es importante observar que algunos residuos de los cultivos se retiran de los campos y se queman como fuente de energía, sobre todo en los países de desarrollo. Las emisiones de este tipo de combustión se han calculado en el módulo correspondiente a la energía en el libro de trabajo del IPCC, 1996. Los usuarios deben velar por que la quema de residuos se asigne correctamente en esas dos categorías y que no se contabilice dos veces.

En este submódulo se consideran exclusivamente las emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) generadas por la quema de residuos de cosecha en campo. De acuerdo con las directrices del IPCC (2006), esta práctica no se contabiliza como fuente neta de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ya que el carbono liberado durante la combustión forma parte del ciclo biogénico y es reabsorbido por la vegetación en periodos posteriores de crecimiento. No obstante, la quema de residuos agrícolas constituye una fuente relevante de emisiones netas de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{NO}_x$ .

#### 5.1.1. Fuentes de los datos

En los anuarios de producción de la FAO se recogen las estadísticas anuales de producción de cultivos para la mayoría de los cultivos cuyos residuos se queman. Los distintos países deberán suministrar información específica acerca de los cultivos de cada país, indicando las relaciones de los residuos respecto a la producción de cultivos, la fracción quemada de los residuos, el contenido de materia seca de los residuos y el contenido de carbono y nitrógeno de los residuos, si disponen de ellos. En el Cuadro 3 “Estadísticas seleccionadas de los residuos de los cultivos” se presentan los datos por defecto para los residuos de los cultivos.

Cuadro 3. Estadísticas seleccionadas de los residuos de los cultivos

Producto	Relación residuo/cultivo	Fracción de materia seca	Fracción de carbono	Relación nitrógeno-carbono
Trigo	1,3	0,78-0,88	0,4853	0,012
Cebada	1,2	0,78-0,88	0,4567	
Maíz	1	0,30-0,50	0,4709	0,02
Avena	1,3			
Centeno	1,6			
Arroz	1,4	0,78-0,88	0,4144	0,014
Mijo	1,4			0,016
Sorgo	1,4			0,02
Guisantes	1,5			
Frijoles	2,1			
Soja	2,1			0,05
Papas	0,4	0,30-0,60	0,4226	
Remolacha	0,3	0,10-0,20 <sup>a</sup>	0,4072 <sup>a</sup>	
Remolacha azucarera	0,2	0,10-0,20 <sup>a</sup>	0,4072 <sup>a</sup>	
Alcachofas	0,8			
Cacahuetes	1			

Nota: Las estadísticas de los cultivos presentadas en esta tabla no son completas. Para los valores no especificados se deben utilizar los correspondientes a cultivos similares.  
 Para más información sobre las fuentes, puede consultarse el *Manual de Referencia para el inventario de los gases de efecto invernadero*.  
<sup>a</sup> Estas estadísticas corresponden a las hojas de la remolacha.

### 5.1.2. Procedimiento

Como llenar la hoja de trabajo:

PASO 1 - Cálculo de la cantidad de residuos

Utilice la hoja de trabajo 4-4 “Quema en el campo de los residuos agrícolas (para anotar los datos correspondientes a este módulo) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Hoja de trabajo 4-4.1 de 3. Quema en el campo de residuos agrícolas

MÓDULO		AGRICULTURA						
SUB-MÓDULO		QUEMA EN EL CAMPO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS						
HOJA DE TRABAJO		4 - 4						
PARTE		1 de 3						
CULTIVOS	PASO 1		PASO 2			PASO 3		
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Producción anual (Gg)	Relación residuo - cultivo	Cantidad de residuo (Gg)	Fracción de materia seca	Cantidad del residuo seco (Gg dm)	Fracción de cultivos quemados	Fracción oxidada	Total, de biomasa quemada (Gg dm)
			$C = A \times B$		$E = C \times D$			$H = E \times F \times G$

1. Especificar los cultivos importantes cuyos residuos son quemados en los campos, anotándolos como categorías en la hoja de trabajo.
2. Para cada tipo de cultivo, indicar en la columna A la producción anual en gigagramos del producto; esta cifra es idéntica a su expresión en kilotoneladas.
3. Anotar en la columna B la relación Residuos-Cultivo para cada tipo de cultivo. Utilizar el Cuadro 3 si no se dispone de estadísticas locales.
4. Multiplicar la producción anual de cada cultivo por la relación de residuos-cultivo a fin de obtener la cantidad de residuos. Indicar el resultado en la columna C.

#### PASO 2 - Estimación de la cantidad de residuos secos

1. Anotar en la columna D la fracción de materia seca para cada tipo de cultivo. En el Cuadro 3 se presentan algunos valores por defecto para algunos tipos de cultivo.

2. Multiplicar la cantidad de residuos por la fracción de materia seca para obtener la cantidad de residuos secos en gigagramos de materia seca (Gg dm- Gg dry matter). Anotar el resultado en la columna E.

#### PASO 3 - Estimación del total de biomasa quemada

1. Anotar en la columna F la fracción quemada en los campos para cada tipo de cultivo. Los valores deben reflejar la media de las prácticas en cada país. No se dispone de datos por defecto.
2. Anotar en la columna G la fracción oxidada correspondiente a cada tipo de cultivo (el valor por defecto es de 0,90).
3. Multiplicar la cantidad de residuos secos por la fracción quemada en los campos y por la fracción de biomasa oxidada para obtener el total de biomasa quemada (en gigagramos de materia seca). Indicar el resultado en la columna H.

#### PASO 4 - Calculo del carbono total liberado

1. Anotar en la columna I la fracción de carbono para cada residuo. En el Cuadro 3 se incluyen los valores por defecto correspondientes a algunos tipos de cultivos. Si o se dispone de otra información, deberá emplearse el valor por defecto correspondiente a la biomasa viva, que es 0,5.
2. Multiplicar el total de biomasa quemada por la fracción de carbono en cada tipo de residuo para obtener el total de carbono liberado en gigagramos de carbono. Indicar los resultados en la columna J.
3. Sumar los totales para cada tipo de cultivo en la columna J y anotar el resultado en la casilla total situada en la parte inferior de la misma.

Cuadro 5. Hoja 4-4. 2 de 3. Quema en el campo de los residuos agrícolas.

MÓDULO	AGRICULTURA			
SUB-MÓDULO	QUEMA EN EL CAMPO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS			
HOJA DE TRABAJO	4 - 4			
PARTE	2 DE 3			
CULTIVOS	PASO 4		PASO 5	
	I	J	K	L
	Fracción de carbón en el residuo	Total, de carbón liberado (Gg C)	Relación carbono - nitrógeno	Total, de nitrógeno liberado (Gg N)
		$J = H \times I$		$L = J \times K$

**PASO 5 - Estimación del total de nitrógeno liberado (Cuadro 5).**

1. Indicar en la columna K la relación de nitrógeno-carbono para cada tipo de cultivo. El valor por defecto general de esta relación para los cultivos oscila entre 0,01 y 0,02. En el Cuadro 3 se incluyen algunos valores específicos para determinados cultivos.
2. Multiplicar el total del carbono liberado (columna J) por la relación nitrógeno-carbono (columna K) para obtener el total del nitrógeno liberado. Indicar el resultado en la columna L.
3. Sumar el total del nitrógeno liberado para cada tipo de cultivo y anotar el resultado en la casilla correspondiente al total en la parte inferior de la columna L.

**PASO 6 - Estimación de las emisiones de gases distintos del CO<sub>2</sub> (Cuadro 7).**

1. Anotar las relaciones de emisión en las casillas correspondientes de la columna M. En el Cuadro 6 se presentan los valores por defecto y los rangos de valores de las tasas de emisión.

Cuadro 6. Tasas de emisión por defecto para la realización de los cálculos de la quema de residuos agrícolas

Gas	Relaciones	
	Por defecto	Rango de valores
CH <sub>4</sub>	0,005	0,003-0,007
CO	0,06	0,04-0,08
N <sub>2</sub> O	0,007	0,005-0,009
NO <sub>x</sub>	0,121	0,094-0,148

Nota: Por lo que respecta a los compuestos de carbono, las relaciones son la masa del carbono liberado como CH<sub>4</sub> o CO (en unidades de C) respecto de la masa total del carbono liberado en la quema (en unidades de C). En cuanto a los compuestos de nitrógeno, éstos se expresan como las relaciones de la masa de compuestos de nitrógeno liberados con respecto a la masa total del nitrógeno liberado del combustible.

Para más información sobre las fuentes, se puede consultar el *Manual de Referencia para el inventario de los gases de efecto invernadero*.

2. Multiplicar el carbono liberado (total de la columna J) por las relaciones de emisión para el CH<sub>4</sub> o el CO (columna M) a fin de obtener las emisiones de carbono expresadas como metano y monóxido de carbono. Indicar los resultados en las casillas correspondientes de la columna N.
3. Multiplicar el nitrógeno liberado (total de la columna L) por las relaciones de emisión para el N<sub>2</sub>O y los NO<sub>x</sub> (columna M) a fin de obtener de nitrógeno expresadas como óxido nitroso y óxidos de nitrógeno. Anotar los resultados en las casillas correspondientes de la columna N.
4. Para cada gas multiplicar por la relación de conversión de la columna O a fin de obtener las emisiones procedentes de la quema de residuos agrícolas.

Anotar los resultados, en gigagramos de cada gas, en las casillas correspondientes de la columna P.

Cuadro 7. Hoja 4-4. 3 de 3. Quema en el campo de los residuos agrícolas

MÓDULO	AGRICULTURA			
SUB-MÓDULO	QUEMA EN EL CAMPO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS			
HOJA DE TRABAJO	4-4			
PARTE	3 DE 3			
COMPUESTO	M	N	O	P
	Relación de emisión	Emisiones (Gg C o Gg N)	Relación de conversión	Emisiones procedentes de la quema en el campo de residuos agrícolas (Gg)
		$N = J \times M$		$P = N \times O$
CH <sub>4</sub>			16/12	
CO			28/12	
N <sub>2</sub> O			44/28	
NO <sub>x</sub>			46/14	

## 5.2. Suelos agrícolas

Se cuenta con información adecuada para calcular las emisiones de N<sub>2</sub>O procedentes de los sistemas agrícolas incluidas las emisiones directas de N<sub>2</sub>O procedentes de los suelos agrícolas (incluidos los sistemas de producción en invernadero y excluyendo los efectos del pastoreo de los animales) las emisiones directas de N<sub>2</sub>O procedentes de los suelos dedicados a la producción animal y las

emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O procedentes del nitrógeno utilizado en la agricultura.

(<sup>1</sup>) Los cálculos pueden llevarse a cabo en 9 pasos en la HOJA DE TRABAJO 4-5.

### 5.2.1. Fuentes de los datos

Todos los datos sobre el aporte pueden tomarse de las bases de datos de la FAO, o en este caso los puedes tomar de las estadísticas del Estado de Querétaro. Es necesario contar con la información siguiente:

- Total de fertilizante sintético utilizado en el país (N<sub>FERT</sub>, en kg N/año).
- Número de cabezas de ganado en el país para las siguientes categorías: ganado no lechero, ganado lechero, aves de corral, ovejas, cerdos y otros animales; N<sub>(T)</sub>.
- Legumbres secas y soya producida en el país (Cultivo<sub>BF</sub>, en kg/año).
- Producción seca de otros cultivos del país (Cultivo<sub>0</sub>, en kg/año).
- Superficie de los suelos orgánicos cultivados (Histosoles) en el país (F<sub>SO</sub>, ha).

### 5.2.2. Procedimiento

El total de emisiones de N<sub>2</sub>O-N en un país (kg N<sub>2</sub>O-N/año) se calcula así:

$$N_2O = N_2O_{DIRECTAS} + N_2O_{INDIRECTAS} + N_2O_{ANIMALES}$$

Como llenar la Hoja de trabajo:

Utilice la HOJA DE TRABAJO 4-5, SUELOS AGRÍCOLAS (Cuadro 8). Estimación de las emisiones directas de óxido nitroso procedentes de los campos agrícolas.

---

<sup>1</sup> Las relaciones de los pesos moleculares indicadas para los gases emitidos son por respecto al peso del nitrógeno o el carbono en la molécula. La relación para el N<sub>2</sub>O es de 44/28 y la de los NO<sub>x</sub> es de 46/14. El NO<sub>2</sub> se ha empleado como molécula de referencia para los NO<sub>x</sub>.

Cuadro 8. Hoja 4-5. 1 de 5. Suelos agrícolas. Emisiones directas de óxido nitroso procedentes de los campos agrícolas, excluyendo histosoles.

MÓDULO	AGRICULTURA		
SUBMÓDULO	SUELOS AGRÍCOLAS		
HOJA DE TRABAJO	4-5		
PARTE	1 DE 5 EMISIONES DIRECTAS DE OXIDO NITROSO DE CAMPOS AGRÍCOLAS, EXCLUYENDO EL CULTIVO EN HISTOSOLES		
Tipo de N agregado al suelo	PASO 1		PASO 2
	A	B	C
	Cantidad de entrada de N (kg N/año)	Factor de emisiones directas EF <sub>1</sub> (kg N <sub>2</sub> O–N/kg N)	Emisiones directas del suelo (Gg N <sub>2</sub> O–N/año)
			C = (A X B ) X 10-6
Fertilizante sintético (F <sub>SN</sub> )			
Estiércol (F <sub>E</sub> )			
Cultivos fijadores de N (F <sub>BN</sub> )			
Residuos de Cultivo (F <sub>RC</sub> )			
	<b>TOTAL</b>		

#### PASO 1 - Cantidad del aporte de N

##### 1. Cálculo del fertilizante sintético utilizado (F<sub>SN</sub>)

Los cálculos de la HOJA DE TRABAJO requieren conocer el total de fertilizante sintético, F<sub>SN</sub>, utilizado en el país excluyendo las emisiones de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> (F<sub>SN</sub>).

Para el cálculo se puede emplear la ecuación siguiente:

#### Ecuación 1

$$F_{SN} = N_{FERT} \times (1 - FRAC_{GASF})$$

En la cual:

N<sub>FERT</sub> = total de fertilizante sintético utilizado en el país (kg N/año);

Frac<sub>GASF</sub> = fracción del total de nitrógeno del fertilizante sintético que se emite como NO<sub>x</sub> + NH<sub>3</sub> (kg N/kg N) (véase el Cuadro 12).

Anotar el  $F_{SN}$  en la columna A de la HOJA DE TRABAJO 4-5, hoja 1.

## 2. Cálculo del nitrógeno procedente del estiércol ( $F_E$ )

Es necesario conocer el número de cabezas de ganado en el país para las categorías siguientes: ganado no lechero, ganado lechero, aves de corral, ovejas, cerdos y otros animales,  $N_{(T)}$ .

Utilizando los factores para el nitrógeno excretado indicados en el Cuadro 9, puede calcularse el nitrógeno total excretado por el ganado atendido al número de cabezas. En el Cuadro 10 se indica el porcentaje del nitrógeno en el estiércol utilizado como combustible ( $F_{RACCOMB}$ ), y el correspondiente al pastoreo de animales (Praderas y Pastizales) ( $F_{RACPAST}$ )

Cuadro 9. Valores por defecto provisionales para el nitrógeno excretado por cabeza de animal por región <sup>a</sup>

Región	Tipo de animal					
	Ganado no lechero	Ganado lechero	Aves de corral	Ovejas	Cerdos	Otros
América del Norte	70	100	0,6	16	20	25
Europa Occidental	70	100	0,6	20	20	25
Europa Oriental	50	70	0,6	16	20	25
Oceanía	60	80	0,6	20	16	25
América Latina	40	70	0,6	12	16	40
África	40	60	0,6	12	16	40
Cercano Oriente y Mediterráneo	50	70	0,6	12	16	40
Asia y Extremo Oriente	40	60	0,6	12	16	40

<sup>a</sup> Fuente: Ecetoc (1994), Vetter et al. (1988), Steffens y Vetter (1990).

Cuadro 10. Valores por defecto para el porcentaje de N en el estiércol producido con diferentes sistemas de manejo del estiércol en diferentes regiones del mundo.

Región	Tipo de animal	Porcentaje de producción de estiércol para cada sistema de manejo del estiércol						
		Lagunas Anaeróbicas	Sistema del tipo líquido	Abonado diario	Almacenamiento sólido y parcelas secas	Praderas y pastizales	Combustible utilizado	Otros sistemas
Oceania	Ganado no lechero (D)	0	0	0	0	100	0	0
	Ganado lechero	0	0	0	0	100	0	0
	Aves de corral (E)	0	0	0	0	3	0	97
	Ovejas	0	0	0	0	100	0	0
	Cerdos	55	0	0	17	0	0	28
	Otros animales (F)	0	0	0	0	100	0	0
América Latina	Ganado no lechero (D)	0	0	0	0	99	0	1
	Ganado lechero	0	1	62	1	36	0	0
	Aves de corral €	0	9	0	0	42	0	49
	Ovejas	0	0	0	0	100	0	0
	Cerdos	0	8	2	51	0	0	40
	Otros animales (F)	0	0	0	0	99	0	1
África	Ganado no lechero (D)	0	0	1	3	96	0	0

(D) – Incluye búfalos

(E) incluye pollos pavos y patos.

(F) incluye caballos, mulas, cabras, asnos y camellos.

Ecuación 2

$$F_E = \left( Nex(1 - (Frac_{COMB} + Frac_{PAST} + Frac_{GASM})) \right)$$

Ecuación 3

$$Nex = \sum_T [ N_{(T)} \times Nex_{(T)} ]$$

Ecuación 4

$$Nex_{(SME)} = \sum_T [ N_{(T)} \times Nex_{(T)} \times SME_{(T)} ]$$

En la cual:

$SME_{(T)}$  = fracción de  $N_{EX(T)}$  que se produce con los diferentes sistemas de manejo del estiércol en el país (tomada de los Cuadros 9 y 10);

$F_E$  = nitrógeno del estiércol utilizado como fertilizante en el país, haciendo la corrección para las emisiones de  $NH_3$  y  $NO_x$  y excluyendo el estiércol producido durante el pastoreo (kg N/año);

$Frac_{COMB}$  = fracción del nitrógeno excretado por el ganado contenido en el estiércol que se quema como combustible (kg N/kg N total excretado);

$Frac_{PAST}$  = fracción del nitrógeno excretado por el ganado y depositado en el suelo durante el pastoreo (kg N/kg N excretado); estimación para el país;

$Frac_{GASM}$  = fracción del total del nitrógeno excretado que se emite como  $NO_x$  o  $NH_3$  (kg N/kg N) (véase el Cuadro 12);

$N_{(T)}$  = número de animales por tipo de animal en el país;

$N_{EX}$  = nitrógeno total excretado por los animales en el país (kg N/año);

$N_{EX(T)}$  = nitrógeno excretado por tipo de animal en el país (kg/año) (véase el Cuadro 9).

$N_{EX(SME)}$  = nitrógeno excretado por sistema de manejo del estiércol (kg/año).

Cuadro 11. Hoja de trabajo 4-5 (adicional). Nitrógeno del estiércol utilizado como fertilizante

MODULO		AGRICULTURA			
SUBMODULO		SUELOS AGRÍCOLAS			
HOJA DE TRABAJO		4-5A (ADICIONAL)			
PARTE		1 DE 1 NITRÓGENO DEL ESTIÉRCOL UTILIZADO			
A	B	C	D	E	F
Total, de N excretado (kg N/año)	Fracción del N quemado como combustible	Fracción del nitrógeno excretado durante el pastoreo	Fracción del N excretado emitido como NO <sub>x</sub> y NH <sub>3</sub>	Suma	Nitrógeno del estiércol utilizado (corregido para las emisiones de NO <sub>x</sub> y NH <sub>3</sub> ) F <sub>AW</sub> (kg N/año)
				$E = 1 - (B + C + D)$	$F = A \times E$

Utilice la Hoja de trabajo 4-5 A (Adicional) (Cuadro 11) para calcular el nitrógeno del estiércol utilizado como fertilizante, haciendo la corrección correspondiente a las emisiones de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> y excluyendo el estiércol producido durante el proceso.

- Anotar en la columna A el total de nitrógeno excretado, N<sub>EX</sub>, para todos los sistemas de manejo del estiércol que aparecen en la columna A, hoja 3 de la HOJA DE TRABAJO 4-1.
- Indicar en la columna B la fracción del nitrógeno quemado como combustible, Frac<sub>COMB</sub>. En el Cuadro 12 aparecen los valores por defecto.
- Anotar en la columna C la fracción de nitrógeno excretado durante el pastoreo, Frac<sub>PAST</sub>. Véase el Cuadro 20.
- Indicar en la columna D la fracción del nitrógeno excretado emitido como NO<sub>x</sub> y NH<sub>3</sub>, Frac<sub>GASM</sub>. Los valores por defecto se indican en el Cuadro 12. Se debe señalar que las cifras están expresadas en porcentaje. Dividir esos

- valores por 100 para obtener la fracción del nitrógeno excretado durante el pastoreo.
- Sumar las columnas B, C y D y restar el total de la unidad. Anotar esa cifra en la columna E.
  - Multiplicar la columna A por la E, e indicar el producto en la columna F, correspondiente al nitrógeno del estiércol utilizado (realizada la corrección para dar cuenta de las emisiones de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_x$  y excluyendo el estiércol producido durante el pastoreo),  $F_E$ .
  - Anotar la cifra  $F_E$  en la columna A de la hoja 1 de la HOJA DE TRABAJO 4-5.

Cuadro 12. Resumen de los valores por defecto para los parámetros.<sup>a</sup>

Frac <sub>QUEM</sub>	=	0,25 en los países en desarrollo; 0,10 o inferior en los países desarrollados (kg N/kg de N en el cultivo)
Frac <sub>COMB</sub>	=	0,0 kg N/kg del nitrógeno excretado <sup>a</sup>
Frac <sub>GASF</sub>	=	0,1 kg $\text{NH}_3\text{-N}$ + $\text{NO}_x\text{-N}$ /kg del nitrógeno en el fertilizante sintético aplicado
Frac <sub>GASM</sub>	=	0,2 kg $\text{NH}_3\text{-N}$ + $\text{NO}_x\text{-N}$ /kg del nitrógeno excretado por el ganado
Frac <sub>PAST</sub>	=	Véase la Tabla A-1, Apéndice A (Columna Praderas y Pastizales). <sup>a</sup>
Frac <sub>LIX</sub>	=	0,3 kg N/kg nitrógeno del fertilizante o el estiércol
Frac <sub>NCRBF</sub>	=	0,03 kg N/kg de biomasa seca
Frac <sub>NCR0</sub>	=	0,015 kg N/kg de biomasa seca
Frac <sub>R</sub>	=	0,45 kg N/kg de N en la cosecha
<sup>a</sup> Se recomienda que los países obtengan datos específicos para los países.		

3. Cálculo del aporte total de nitrógeno en cultivos fijadores del nitrógeno ( $F_{BN}$ )  
 El aporte de nitrógeno de los cultivos fijadores del nitrógeno ( $F_{BN}$ , kg N/año) puede calcularse a partir de la producción de legumbres secas y soya en el país,  $\text{Cultivo}_{BF}$  (kg/año).

#### Ecuación 5

$$F_{BN} = 2 \times CULTIVO_{BF} \times FRAC_{NCRBF}$$

En la cual:

Cultivo<sub>BF</sub> = producción de legumbres secas + soya en el país (kg biomasa seca/año);

Frac<sub>NCRBF</sub> = fracción del nitrógeno en cultivos fijadores del nitrógeno (kg N/kg de biomasa seca) (véase el Cuadro 12). El factor 2 permite convertir las cifras de la FAO para la producción de cultivos a total de biomasa de los cultivos.

Anotar F<sub>BN</sub> en la columna A de la HOJA DE TRABAJO 4-5, hoja 1.

#### 4. Cálculo del aporte de nitrógeno procedente de los residuos de las cosechas (F<sub>RC</sub>).

Los datos necesarios para calcular el aporte de nitrógeno de los residuos de las cosechas (F<sub>RC</sub>) son los siguientes:

- Producción de legumbres secas y soya en el estado, Cultivo<sub>BF</sub> (kg/año)
- Producción de otros cultivos en el estado, Cultivo<sub>0</sub> (kg/año)

Esas cifras pueden tomarse de las bases de datos de la FAO, o de los estadísticos locales.

Los residuos de las cosechas reintegrados a los suelos (F<sub>RC</sub>, en kg N/año) se calculan empleando la ecuación siguiente:

#### Ecuación 6

$$F_{RC} = 2 \times [Cultivo_0 \times Frac_{NCR0} + Cultivo_{BF} \times Frac_{NCRBF}] \times (1 - Frac_R) \times (1 - Frac_{QUEM})$$

En la cual:

Cultivo<sub>BF</sub> = producción de legumbres secas + soya en el país (kg biomasa seca/año);

Cultivo<sub>0</sub> = producción de cultivos no fijadores del nitrógeno en el país (kg biomasa seca/año)

Frac<sub>NCRBF</sub> = fracción del nitrógeno en cultivos fijadores del nitrógeno (kg N/kg de biomasa seca) (véase el Cuadro 12);

Frac<sub>NCR0</sub> = fracción del nitrógeno en cultivos no fijadores del nitrógeno (kg N/kg de biomasa seca) (véase el Cuadro 12);

Frac<sub>R</sub> = fracción de los residuos de las cosechas que se retira de los campos durante la cosecha (kg N/kg cosecha-N) (véase el Cuadro 12);

Frac<sub>QUEM</sub> = fracción de residuos de la cosecha que se quema en lugar de ser abandonados en los campos (véase el Cuadro 12).

El factor 2 permite realizar la conversión de las cifras de producción de cultivos comestibles en las cifras totales de producción de biomasa de la cosecha.

Cuadro 13. Hoja de trabajo 4-5B (adicional) para calcular el aporte de nitrógeno correspondiente a los residuos de las cosechas

MODULO		AGRICULTURA				
SUBMODULO		SUELOS AGRÍCOLAS				
HOJA DE TRABAJO		4-5B (ADICIONAL)				
PARTE		1 DE 1 ENTRADA DE NITRÓGENO POR RESIDUOS DE LOS CULTIVOS				
A	B	C	D	E	F	G
Producción de cultivos no fijadores de nitrógeno (kg biomasa seca/año)	Fracción de nitrógeno de los cultivos no fijadores de nitrógeno (kg N/kg biomasa seca)	Producción de legumbres y soya (kg biomasa seca/año)	Fracción de N en cultivos fijadores de nitrógeno (kg N/kg biomasa seca)	Uno menos la fracción de residuos de cultivos retirados del campo	Uno menos la fracción de residuos de cultivos quemados	Nitrógeno agregado de los residuos de cultivos F <sub>CR</sub> (kg N/año)
						$G = 2 \times (A \times B + C \times D) \times E \times F$

- a. Indicar en la columna A (Cuadro 13) la producción de cultivos no fijadores del nitrógeno,  $cultivo_0$ , en el país. Si no se contara con los datos de producción tales como los correspondientes a la biomasa seca, multiplicar  $cultivo_0$  por  $(1-0,15)$  para dar cuenta del contenido de humedad de la cosecha.
- b. Anotar en la columna B la fracción de nitrógeno de los cultivos no fijadores del nitrógeno,  $Frac_{NCR0}$ . En el Cuadro 12 se indican los valores por defecto.
- c. Anotar en la columna C la producción de legumbres secas y soya,  $cultivo_{BFN}$ . Si no se cuenta con los datos de producción tales como los correspondientes a la biomasa seca, multiplicar  $cultivo_0$  por  $(1-0,15)$  para dar cuenta del contenido de humedad de la cosecha.
- d. Anotar en la columna D la fracción del nitrógeno en los cultivos fijadores del nitrógeno,  $Frac_{NCRBF}$ . Los datos por defecto se presentan en el Cuadro 12.
- e. Restar la unidad la fracción de residuos de las cosechas retirados de los campos,  $Frac_R$ , e indicar el resultado en la columna F. En el Cuadro 12 se indican los valores por defecto.
- f. Restar de la unidad la fracción de residuos de las cosechas quemados,  $Frac_{QUEM}$ , e indicar el resultado en la columna G. En el Cuadro 12 se indican los valores por defecto.
- g. Multiplicar la columna A por la B, y la columna C por la D. Sumar los productos, y multiplicar el resultado por las cifras de las columnas F y G. Multiplicar el resultado por 2, indicándolo en la columna H para obtener el aporte de nitrógeno de los residuos de las cosechas,  $F_{RC}$ .
- h. Anotar la cifra del  $F_{RC}$  en la columna A de la HOJA DE TRABAJO 4-5, HOJA 1.

PASO 2- Estimación de las emisiones directas de óxido nitroso excluido el cultivo de los histosoles.

1. Indicar en la columna B los factores de emisión para las emisiones directas. Para el factor de emisión  $F_{EI}$  utilice los valores por defecto presentados en el Cuadro 14, o cifras más precisas si estuvieran disponibles localmente.
2. Multiplicar la cantidad de aporte de N (columna A) por el factor de emisión para las emisiones directas (columna B) a fin de obtener las emisiones directas del  $N_2O$  procedentes de los suelos. Multiplicar el resultado final por  $10^{-6}$  para expresarlo en gigagramos. Anotar los resultados en la columna C.
3. Sumar las emisiones directas de los suelos y anotar el total en la parte inferior de la columna C.

PASO 3- Estimación de las emisiones directas de  $N_2O$  procedentes del cultivo de los Histosoles.

1. Indicar en la columna D la superficie de los suelos orgánicos cultivados,  $F_{SO}$ .
2. Anotar en la columna E el factor de emisión para las emisiones directas de los suelos. Para el factor de emisión,  $FE_2$  utilice los valores por defecto presentados en el Cuadro 14, o emplee datos más precisos si estuvieran disponibles localmente.
3. Multiplicar la superficie de los suelos orgánicos cultivados (columna D) por el factor de emisión para las emisiones directas de los suelos (columna E) para obtener el total de emisiones directas de los histosoles. Multiplicar el resultado final por  $10^{-6}$  para expresarlo en gigagramos. Indicar el resultado en la columna F.

Cuadro 14. Resumen de los factores de emisión por defecto para las emisiones de N<sub>2</sub>O en la agricultura.

FE <sub>1</sub>	=	0,0125 (0,0025-0,0225) kg N <sub>2</sub> O–N/kg de aporte de nitrógeno
FE <sub>2</sub>	=	5 templado y 10 tropical (2-15) (kg N/ha/año)
FE <sub>3</sub>	=	véase la Tabla 4-8
FE <sub>4</sub>	=	0,01 (0,002-0,02) kg N <sub>2</sub> O–N por kg NH <sub>3</sub> –N y NO <sub>x</sub> –N emitidos
FE <sub>5</sub>	=	0,025 (0,002-0,12) kg N <sub>2</sub> O–N por kg de lixiviación/escorrentía de nitrógeno
FE <sub>6</sub>	=	0,01 (0,002-0,12) kg N <sub>2</sub> O–N por kg de N en las aguas residuales producido

PASO 4- Estimación del total de emisiones directas de N<sub>2</sub>O (Cuadro 15)

Cuadro 15. Hoja de trabajo 4-5. 2 de 5. Suelos agrícolas.

MÓDULO	AGRICULTURA			
SUB-MÓDULO	SUELOS AGRÍCOLAS			
HOJA DE TRABAJO	4-5			
PARTE	2 DE 5 EMISIONES DIRECTAS DE ÓXIDO NITROSO DE HISTOSOLES CULTIVADOS			
	PASO 3			PASO 4
	D	E	F	G
	Superficie cultivada de suelos orgánicos F <sub>os</sub> (ha)	Factor de emisión de las emisiones directas del suelo EF <sub>2</sub> (kg N <sub>2</sub> O–N/ha/año)	Emisiones directas de Histosoles (Gg N <sub>2</sub> O–N/año)	Total de emisiones directas de N <sub>2</sub> O (Gg)
			$F = (D \times E) \times 10^{-6}$	$G = (C + F) \times (44/28)$
<b>SUBTOTAL</b>				

Las emisiones directas de N<sub>2</sub>O pueden calcularse empleando la ecuación siguiente:

Ecuación 7

$$N_2O_{DIRECTAS} \left( kg \frac{N}{año} \right) = [ F_{SN} + F_E + F_{RC} + F_{BN} ] \times FE_1 + F_{SO} \times FE_2$$

1. Sumar los dos totales de las columnas C y F y multiplicar el resultado por la relación de conversión 44/28 para obtener el total de las emisiones directas de N<sub>2</sub>O. Indicar el resultado en la columna G.

PASO 5- Estimación de las emisiones de N<sub>2</sub>O de los suelos procedentes del pastoreo de animales (Cuadro 16).

Cuadro 16. Hoja de trabajo 4-5. 3 de 5. Suelos agrícolas.

MÓDULO	AGRICULTURA		
SUBMÓDULO	SUELOS AGRÍCOLAS		
HOJA DE TRABAJO	4-5		
PARTE	3 DE 5 EMISIONES DE OXIDO NITROSO DEL SUELO PROCEDENTE DEL PASTOREO DE ANIMALES - PRADERAS Y PASTIZALES		
<b>PASO 5</b>			
	A	B	C
Sistema de manejo de estiércol (SME)	Nitrógeno excretado N <sub>EX</sub> (SME) (kg N/año)	Factor de emisión SME EF <sub>3</sub> (kg N <sub>2</sub> O– N/kg N)	Emisiones de N <sub>2</sub> O por el pastoreo de animales (Gg)
Praderas y pastizales			C = (A X B)(44/28) X 10- 6

En este punto se indican solamente las emisiones procedentes de praderas y pastizales. Las emisiones de N<sub>2</sub>O correspondientes a otros sistemas de manejo del

estiércol se consignan en el rubro manejo del estiércol. Las emisiones de N<sub>2</sub>O procedentes del pastoreo de animales (N<sub>2</sub>O<sub>ANIMALES</sub> en kg N/año) pueden calcularse de la manera siguiente:

Ecuación 8

$$N_2O_{ANIMALES} = N_2O_{(SME)} = \sum_{(T)} [ N_{(T)} \times Nex_{(T)} \times SME_{(T)} \times FE_{3(SME)} ]$$

En la cual:

N<sub>2</sub>O<sub>ANIMALES</sub> = Emisiones de N<sub>2</sub>O correspondientes a la producción pecuaria en un país (kg N/año);

N<sub>2</sub>O<sub>(SME)</sub> = Emisiones de N<sub>2</sub>O procedentes de los sistemas de manejo del estiércol en el país (kg N/año);

$$= [N_{(T=1)} \times Nex_{(T=1)} \times SME_{(T=1)} \times FE_{3(SME)}] + \dots + [N_{(T=TMAX)} \times Nex_{(T=TMAX)} \times SME_{(T=TMAX)} \times FE_{3(SME)}];$$

N<sub>(T)</sub> = número de animales por tipo T en el país;

N<sub>EX(T)</sub> = N excreción de los animales de tipo T en el país (kg N/animal/año); (véase el Cuadro 9)

SME<sub>(T)</sub> = Fracción de N<sub>EX(T)</sub> que se maneja en uno de los varios sistemas de manejo del estiércol para los animales de tipo T en el país; (véase el Cuadro 10);

FE<sub>3(SME)</sub> = Factor de emisión de N<sub>2</sub>O para un SME (kg N<sub>2</sub>O-N/kg de N<sub>EX</sub> en SME); (véase el Cuadro 12);

T = tipo de categoría de animal;

T<sub>MAX</sub> = tipos máximos de animales para los que se establece una distinción en el país.

1. Anotar en la columna A el valor del nitrógeno excretado, N<sub>EX(SME)</sub>, correspondiente a praderas y pastizales (de la HOJA DE TRABAJO 4-1 Adicional).

2. Anotar en la columna B el factor de emisión para los sistemas de manejo del estiércol. Utilizar los valores por defecto para los factores de emisión,  $FE_3$ , indicados en el Cuadro 14 o cifras más precisas si estuvieran disponibles localmente.
3. Multiplicar  $N_{EX(SME)}$  (columna A) por el factor de emisión (columna B) y a continuación por la relación de conversión 44/28 a fin de obtener las emisiones de óxido nitroso procedentes del pastoreo de animales. Multiplicar el resultado final por  $10^{-6}$  para expresarlo en gigagramos. Indicar el resultado en la columna C.

PASO 6. Estimación de las emisiones indirectas procedentes de la deposición atmosférica de  $NH_3$  y  $NO_x$  (Cuadro 17).

Cuadro 17. Hoja de trabajo 4-5. 4 de 5. Suelos agrícolas.

MÓDULO	AGRICULTURA							
SUBMÓDULO	SUELOS AGRÍCOLAS							
HOJA DE TRABAJO	4-5							
HOJA	4 DE 5 EMISIONES INDIRECTAS DE ÓXIDO NITROSO PROCEDENTES DE LA DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA DE $NH_3$ Y $NO_x$							
PASO 6								
Tipo de deposición	A N en el fertilizante sintético aplicado a los suelos, $N_{FERT}$ (kg N/año)	B Fracción del N en el fertilizante sintético aplicado que se volatiliza $Frac_{GASF}$ (kg N/kg N)	C Cantidad del N en el fertilizante sintético aplicado que se volatiliza (kg N/kg N)	D Total de N excretado por el ganado $N_{EX}$ (kg N/año)	E Fracción del total de N en el estiércol excretado que se volatiliza $Frac_{GASM}$ (kg N/kg N)	F Total de N excretado por el ganado que se volatiliza (kg N/kg N)	G Factor de emisión $FE_4$ (kg $N_2O-N$ /kg N)	H Emisiones de óxido nitroso (Gg $N_2O-N$ /año)
			$C = (A \times B)$			$F = (D \times E)$		$H = (C + F) \times 10^{-6}$
Total								

1. Indicar en la columna A la cantidad total de N en el fertilizante sintético aplicado a los suelos  $N_{(Fert)}$ . (Cuadro 17).
2. Anotar en la columna B la Fracción de N en el fertilizante sintético aplicado que se volatiliza ( $Frac_{GASF}$ ). Utilizar los valores por defecto presentados en el Cuadro 12 o cifras locales más precisas si se dispusiera de ellas.
3. Multiplicar la cantidad total de Fertilizante sintético aplicado en el país (columna A) por la fracción del N en el fertilizante sintético aplicado en el país (columna A) por la fracción del N en el fertilizante sintético aplicado que

se volatiliza (columna B) a fin de obtener la cantidad total de fertilizante sintético aplicado a los suelos que se volatiliza. Indicar el resultado en la columna C.

4. Anotar la excreción total de N por el ganado ( $N_{EX}$ ) calculada empleando la ecuación 3 en la columna D.
5. Anotar en la columna E la fracción del total de N excretado en el estiércol que se volatiliza ( $Frac_{GASM}$ ). Utilizar los valores por defecto presentados en el Cuadro 12, o cifras locales más precisas si se dispusiera de ellas.
6. Multiplicar el total de N excretado por el ganado, ( $N_{EX}$ ), (columna D) por la fracción del total de N excretado en el estiércol que se volatiliza,  $Frac_{GASM}$ , (columna E). Indicar el resultado en la columna F.
7. Indicar en la columna G el factor de emisión  $FE_4$ . Utilizar los valores por defecto presentados en el Cuadro 14, o cifras locales más precisas si se dispusiere de ellas.
8. Sumar las columnas C y F y seguidamente multiplicar por el Factor de Emisión  $FE_4$ , (columna G) a fin de obtener las emisiones de óxido nitroso. Multiplicar el resultado final por  $10^{-6}$  para expresarlo en gigagramos. Indicar el resultado en la columna H.

PASO 7 – Estimación de las emisiones indirectas procedentes de la lixiviación (Cuadro 18).

1. Anotar en la columna I la cantidad total de fertilizante utilizado en el país  $N(FERT)$
2. Indicar en la columna J el total de N excretado por el ganado ( $N_{EX}$ ), calculado con la ecuación 3.
3. Anotar en la columna K la fracción de N lixiviado,  $Frac_{LIX}$ . Utilice los valores por defecto presentados en el Cuadro 12 o cifras locales más precisas si se dispusiere de ellas.

4. Indicar en la columna L el factor de emisión FE<sub>5</sub>. Utilice los valores por defecto presentados en el Cuadro 14 o cifras locales más precisas si se dispusiere de ellas.
5. Sumar la cantidad total de fertilizante sintético utilizado en el país N<sub>(FERT)</sub> (columna I) a N<sub>EX</sub> (columna J). Multiplicar el resultado por Fra<sub>LIX</sub> (columna K) y a continuación por FE<sub>5</sub> (columna L) a fin de obtener las emisiones indirectas de óxido nitroso procedentes de la lixiviación. Multiplicar el resultado final por 10<sup>-6</sup> para expresarlo en gigagramos. Indicar el resultado en la columna M.

Cuadro 18. Hoja de trabajo 4-5. 5 de 5. Suelos Agrícolas

MÓDULO		AGRICULTURA					
SUBMÓDULO		SUELOS AGRICOLAS					
HOJA DE TRABAJO		4-5					
HOJA		5 DE 5 EMISIONES INDIRECTAS DE ÓXIDO NITROSO PROCEDENTES DE LA LIXIVIACIÓN					
PASO 7				PASO 8		PASO 9	
I	J	K	L	M	N	O	
Fertilizante sintético utilizado N <sub>FERT</sub> (kg N/año)	Excreción de N del ganado N <sub>EX</sub> (kg N/año)	Fracción de N lixiviado Fra <sub>LIX</sub> (kg N/kg N)	Factor de emisión FE <sub>5</sub>	Emisiones de óxido nitroso procedentes de la lixiviación (Gg N <sub>2</sub> O-N/año)	Total de emisiones indirectas de óxido nitroso (Gg N <sub>2</sub> O/año)	Total de emisiones de óxido nitroso (Gg)	
				$M = (I + J) \times K \times L \times 10^{-6}$	$N = (H + M) [44/28]$	$O = (G + C + N)$ (G de la HOJA DE TRABAJO 4-5, hoja 2, Paso 4; C de la HOJA DE TRABAJO 4-5, hoja 3, Paso 5; N de la HOJA DE TRABAJO 4-5, hoja 5, Paso 8).	
Total							

#### PASO 8 - Estimación de las emisiones indirectas

Las emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O (kg/año) pueden calcularse en la HOJA DE TRABAJO 4-5, Hojas 1 (deposición atmosférica) y 2 (lixiviación y escorrentía) empleando la ecuación siguiente:

#### Ecuación 9

$$N_2O_{INDIRECTAS} = N_2O_{(G)} + N_2O_{(L)}$$

En la cual:

$$N_2O_{(G)} = (N_{FERT} \times Frac_{GASF} + NexFrac_{GASM}) \times FE_4$$

$$N_2O_{(L)} = (N_{FERT} + Nex) \times Frac_{LIX} \times FE_5$$

En la cual:

Frac<sub>LIX</sub>= fracción del aporte de nitrógeno en los suelos que se pierde debido a la lixiviación y a la escorrentía (kg N/kg de nitrógeno aplicado); (Cuadro 19);

N<sub>2</sub>O<sub>INDIRECTAS</sub>= emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O del país (kg N/año);

N<sub>2</sub>O<sub>(G)</sub> = emisiones de N<sub>2</sub>O del país debidas a la deposición atmosférica de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> (kg N/año);

N<sub>2</sub>O<sub>(L)</sub>= Emisiones de N<sub>2</sub>O del país debidas a la lixiviación y la escorrentía de nitrógeno (kg N/año).

1. Sumar los dos totales en las columnas H y M y seguidamente multiplicar por la relación de conversión 44/28 para obtener el total de emisiones indirectas de óxido nitroso. Indicar el resultado en la columna N.

PASO 9- Total de emisiones de N<sub>2</sub>O procedentes de los suelos agrícolas

El total de emisiones de óxido nitroso procedentes de los suelos agrícolas puede calcularse sumando las emisiones directas (HOJAS DE TRABAJO 4-5, hoja 2, paso 4), las emisiones correspondientes al estiércol (HOJA DE TRABAJO 4-5, hoja 3, paso 5) y las emisiones indirectas (HOJA DE TRABAJO 4-5, hoja 5, paso 8). En consecuencia:

El total de las emisiones de N<sub>2</sub>O – N de un país (kg N<sub>2</sub>O-N/año) puede calcularse con la ecuación siguiente:

Ecuación 10

$$N_2O = N_2O_{DIRECTAS} + N_2O_{INDIRECTAS} + N_2O_{ANIMALES}$$

Sumar los totales en la columna G (HOJA DE TRABAJO 4-5, hoja 2, paso 4), la columna C (HOJA DE TRABAJO 4-5, hoja 3, paso 5) y la columna N (HOJA DE TRABAJO 4-5, hoja 5, paso 8) a fin de obtener el total de emisiones de óxido nitroso procedentes de los suelos agrícolas. Indicar el resultado en la columna O. (Cuadro 18)

Cuadro 19. Valores por defecto de los parámetros para las emisiones indirectas.

Fra <sub>CNPR</sub>	0,16 kg N/kg de proteína
Fra <sub>CLIX</sub>	0,3 (0,1-0,8) kg N/kg de fertilizante o de estiércol

Cuadro 20. Datos utilizados para calcular la excreción de N en el estiércol y los factores de emisión de N<sub>2</sub>O.

Región	Tipo de animal	Número de animales (x 10 <sup>6</sup> )	Nitrógeno excretado kg N/ animal/año	Factor de emisión para los SME FE <sub>3</sub> (% de N excretado en el estiércol que se pierde como N <sub>2</sub> O)							Total N excretado (Tg N)
				Lagunas anaeróbicas (FE <sub>3</sub> )	Sistemas de tipo líquido (FE <sub>3</sub> )	Abonado diario (FE <sub>3</sub> )	Almacenamiento sólido y parcelas secas (FE <sub>3</sub> )	Praderas y pastizales (FE <sub>3</sub> )	Combustible utilizado (FE <sub>3</sub> )	Otros sistemas (FE <sub>3</sub> )	
Oceania	Ganado no lechero	27.610	60	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	1,7
	Ganado lechero	4.441	80	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	0,4
	Aves de corral (E)	71.000	0,6	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	0,0
	Ovejas	228.982	20	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	4,6
	Cerdos	5.003	16	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	0,1
	Otros animales (F)	2.579	25	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	0,1
América Latina	Ganado no lechero	272.871	40	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	10,9
	Ganado lechero	37.560	70	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	2,6
	Aves de corral (E)	1259.000	0,6	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	0,8
	Ovejas	117.312	12	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	1,4
	Cerdos	78.150	16	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	1,3
	Otros animales (F)	71.699	40	0,1	0,1	0,0	2,0	2,0	0,0	0,5	2,9

(E) incluye pollos pavos y patos.

(F) incluye caballos, mulas, cabras, asnos y camellos.

### 5.3. Niveles de especificidad en las estimaciones de las emisiones.

La selección de un método para estimar las emisiones dependerá del grado de detalle en la estimación, la disponibilidad de datos de actividad, los factores de

emisión y los recursos financieros y humanos disponibles para terminar el inventario. En la terminología del IPCC, el método jerárquico más bajo o el más sencillo es el “Nivel 1”, mientras que los métodos más detallados son el “Nivel 2” o el “Nivel 3”.

Los métodos nivel 1 utilizan los factores de emisión por defecto del IPCC y requieren los datos de actividad básicos y menos desagregados. Los niveles más altos utilizan métodos más detallados y factores de emisión fuente-específicos, tecnología-específicos y región-específicos con mediciones y datos de actividad más altamente desagregados (SEMARNAT, INE, 2008)

#### 5.4. Calidad del Inventario y Nivel de Incertidumbre

Un inventario de alta calidad debe poseer las siguientes cualidades: ser completo, consistente, comparable, transparente y preciso, seguir al pie de la letra los manuales del IPCC nos ayudan a cumplir con estos requisitos y también a cuantificar la Incertidumbre. De acuerdo con las directrices del IPCC de 1996, la incertidumbre es un componente inherente a la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero, derivado principalmente de la variabilidad en los factores de emisión, la calidad de los datos de actividad y los supuestos metodológicos empleados.

No obstante, dichas directrices abordan la incertidumbre desde un enfoque principalmente cualitativo, sin establecer metodologías obligatorias para su cuantificación. En este sentido, y considerando la disponibilidad y naturaleza de la información utilizada en el presente estudio, la incertidumbre se analiza de manera descriptiva, identificando sus principales fuentes y posibles efectos sobre los resultados. Por lo tanto, los valores estimados deben interpretarse como aproximaciones razonables dentro del marco metodológico aplicado, manteniendo coherencia con el nivel de detalle (Tier 1) propuesto por el IPCC-1996. Se reconoce que un análisis cuantitativo más robusto requeriría la aplicación de metodologías

desarrolladas en guías posteriores, como las del IPCC del 2000 y 2006, lo cual queda fuera del alcance del presente trabajo.

De acuerdo con las guías de buenas prácticas del IPCC, la estimación de incertidumbres es un elemento esencial de un inventario de emisiones completo. La estimación y reporte de las incertidumbres permiten priorizar los esfuerzos por mejorar la exactitud de los inventarios en el futuro, definir los temas específicos en los que es necesario realizar investigación para mejorar los atributos del inventario y orientar las decisiones sobre la elección de la metodología (PNUD, 2008). La incertidumbre puede estar asociada con la determinación de los factores de emisión, la vigilancia continua de emisiones, la extracción de factores de emisiones de fuentes publicadas o de los datos de actividad (INE, 2006).

## 6. RESULTADOS

Para la realización del inventario, se emplearon los factores de emisión marcados por la Metodología del IPCC (1996), y de acuerdo con la metodología del árbol de decisiones, se determinó llevar a cabo un análisis Tier nivel 1.

Se utilizó la información de los cierres agrícolas proporcionados por la Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, del país, en el estado de Querétaro, que contiene información de las temporadas otoño-invierno y primavera-verano 2006 Y 2023 (DGSIAP, 2025). Los fertilizantes en la producción agrícola aparecen como esenciales porque la productividad de la tierra está directamente relacionada con el uso de ellos, debido a esto es muy importante su consideración para estos cálculos. En el estado de Querétaro no se tienen estadísticas del uso de fertilizantes, entonces se hizo un cálculo en base a las unidades de nitrógeno que se necesitan para la producción de cada cultivo además de tomar en cuenta la modalidad de producción que nos da la DGSIAP.

### 6.1. Quema en el campo de residuos agrícolas

En el estado de Querétaro, aproximadamente solo el 10% de los cultivos de trigo y cebada se queman, ya que lo demás se usa para pastura, no todos los años es el mismo porcentaje de quema de residuos, depende de la demanda de pastura y su precio.

#### PASO 1 - Cálculo de la cantidad de residuos

Primero usaremos la Hoja de trabajo 4-4 “Quema en el campo de los residuos agrícolas” parte 1 de 3, anotando los cultivos que se queman en el estado como el trigo y la cebada, en la columna A anotamos la producción anual de cada cultivo. En la columna B, se anotan los datos de la relación residuo-cultivo que vienen en el cuadro 3 “Estadísticas seleccionadas de los residuos de los cultivos”, y así se

multiplica la columna A por la B y se coloca en la C obteniendo la cantidad de residuo.

#### PASO 2 - Estimación de la cantidad de residuos secos

Se anota en la columna D la fracción de materia seca del Cuadro 3 y posteriormente se multiplica la columna C por la D generando la E “Cantidad del residuo seco”.

#### PASO 3 - Estimación del total de biomasa quemada

Luego se coloca en la columna F la fracción del 10 % que habíamos mencionado para los cultivos quemados, la columna G es un valor por defecto 0.9 y la columna H, el total de biomasa quemada se obtiene multiplicando la columna E, la F y la G, quedando como se muestra en el Cuadro 21.

Cuadro 21. HOJA 4-4.1 Quema en el campo de los residuos agrícolas.

MODULO		AGRICULTURA							
SUB-MODULO		QUEMA EN EL CAMPO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS							
HOJA DE TRABAJO		4-4							
PARTE		1 de 3							
CULTIVOS		PASO 1		PASO 2			PASO 3		
		A	B	C	D	E	F	G	H
		Producción anual (Gg)	Relación residuo - cultivo	Cantidad de residuo (Gg)	Fracción de materia seca	Cantidad del residuo seco (Gg dm)	Fracción de cultivos quemados	Fracción oxidada	Total de biomasa quemada (Gg dm)
2006	Cebada	7.724	1.2	9.27	0.8	7.42	0.1	0.9	0.67
	Trigo	2.014	1.3	2.62	0.8	2.09	0.1	0.9	0.19
	<b>TOTAL</b>								<b>0.86</b>
2023	Cebada	18.366	1.2	22.04	0.8	17.63	0.1	0.9	1.59
	Trigo	1.391	1.3	1.81	0.8	1.45	0.1	0.9	0.13
	<b>TOTAL</b>								<b>1.72</b>

#### PASO 4 - Calculo del carbono total liberado

En la Hoja de trabajo 4-4 “Quema en el campo de los residuos agrícolas”, parte 2 de 3, en la columna I se anota la fracción de carbono para cada residuo obtenida del cuadro 3, y para la columna J que es el total de carbón liberado, se multiplica la columna H por la I. Sumar los totales para cada tipo de cultivo en la columna J y anotar el resultado en la casilla total situada en la parte inferior de la misma.

#### PASO 5 - Estimación del total de nitrógeno liberado

En la columna K se pone la relación carbono – nitrógeno para cada tipo de cultivo, que también se saca del Cuadro 3. Multiplicar el total del carbono liberado (columna J) por la relación nitrógeno-carbono (columna K) para obtener el total del nitrógeno liberado. Indicar el resultado en la columna L, que es el total de nitrógeno liberado, como se observa en el Cuadro 22.

Cuadro 22. Hoja 4-4.2 Quema en el campo de los residuos agrícolas.

MODULO		AGRICULTURA			
SUB-MODULO		QUEMA EN EL CAMPO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS			
HOJA DE TRABAJO		4-4			
PARTE		2 DE 3			
CULTIVOS		PASO 4		PASO 5	
		I	J	K	L
		Fracción de carbón en el residuo	Total de carbón liberado (Gg C)	Relación carbono - nitrógeno	Total de nitrógeno liberado (Gg N)
2006	Cebada	0.4567	0.3048	0.012	0.0037
	Trigo	0.4853	0.0913	0.012	0.0011
	<b>TOTAL</b>		<b>0.3961</b>	<b>TOTAL</b>	<b>0.0048</b>
2023	Cebada	0.4567	0.7247	0.012	0.0087
	Trigo	0.4853	0.0632	0.012	0.0008
	<b>TOTAL</b>		<b>0.7879</b>	<b>TOTAL</b>	<b>0.0095</b>

PASO 6 - Estimación de las emisiones de gases distintos del CO<sub>2</sub>.

La hoja de trabajo 4-4 “Quema en el campo de los residuos agrícolas” parte 3 de 3, es para obtener la estimación de las emisiones de gases distintos del dióxido de carbono. Para ello se anotan la relación de emisiones en la columna M, que se sacan del Cuadro 6, y luego esta se multiplica por el carbono liberado (total de la columna J) para sacar la columna N que son las emisiones de carbono expresadas como metano y monóxido de carbono. Multiplicar el nitrógeno liberado (total de columna L), por las relaciones de emisión para el N<sub>2</sub>O y los NO<sub>x</sub> (columna M) para obtener la N. Posteriormente para cada gas multiplicar por la relación de conversión de la columna O, a fin de obtener las emisiones procedentes de la quema de residuos agrícolas para sacar la columna P, como se observa en el Cuadro 23.

Cuadro 23. HOJA 4-4.3 Quema en el campo de los residuos agrícolas.

MODULO		AGRICULTURA			
SUB-MODULO		QUEMA EN EL CAMPO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS			
HOJA DE TRABAJO		4-4			
PARTE		3 DE 3			
COMPUESTO	M	N	O	P	
	Relación de emisión	Emisiones (Gg C o Gg N)	Relación de conversión	Emisiones procedentes de la quema en el campo de residuos agrícolas (Gg)	
2006	CH <sub>4</sub>	0.005	0.001980327	16/12	<b>0.0026</b>
	CO	0.06	0.023763919	28/12	<b>0.0554</b>
	N <sub>2</sub> O	0.007	0.0000336	44/28	<b>0.0001</b>
	NO <sub>x</sub>	0.121	0.0005808	46/14	<b>0.0019</b>
2023	CH <sub>4</sub>	0.005	0.003939433	16/12	<b>0.0053</b>
	CO	0.06	0.047273201	28/12	<b>0.1103</b>
	N <sub>2</sub> O	0.007	6.61825E-05	44/28	<b>0.0001</b>
	NO <sub>x</sub>	0.121	0.001144011	46/14	<b>0.0038</b>

## 6.2. Suelos Agrícolas

El total de emisiones de N<sub>2</sub>O-N en un país (kg N<sub>2</sub>O-N/año) se calcula así:

$$N_2O = N_2O_{DIRECTAS} + N_2O_{ANIMALES} + N_2O_{INDIRECTAS}$$

### PASO 1 - Cantidad del aporte de N

Los cálculos de la hoja de trabajo requieren conocer el total de fertilizante sintético,  $F_{SN}$ , utilizado en el país excluyendo las emisiones de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> ( $F_{SN}$ ). Para el cálculo se puede emplear la Ecuación 1:

$$F_{SN} = N_{FERT} \times (1 - FRAC_{GASF})$$

$N_{FERT}$  = total de fertilizante sintético utilizado en el país (kg N/año);

$FRAC_{GASF}$  = fracción del total de nitrógeno del fertilizante sintético que se emite como NO<sub>x</sub> + NH<sub>3</sub> (kg N/kg N) (véase el Cuadro 12).

El total del fertilizante consumido en el estado se calculó en base a las unidades de nitrógeno para la producción de cada cultivo (Cuadro 24) y los datos de la superficie cultivada del estado, que se tomaron de la DGSIAP en 2025.

Cuadro 24. Cultivos principales y la cantidad total de fertilizantes nitrogenados ocupados en el estado de Querétaro (2006 Y 2023) (DGSIAP, 2025).

#### 2006

CULTIVO	SUPERFICIE (HAS)	CANTIDAD FS (KG/HA)	CANTIDAD TOTAL FS(KG/AÑO)
MAIZ	109,293.20	250.00	27,323,300.00
FRIJOL	17,013.40	100.00	1,701,340.00
SORGO	7,205.00	300.00	2,161,500.00
AVENA	4,722.00	150.00	708,300.00
CEBADA	1,389.00	150.00	208,350.00
TRIGO	619.00	200.00	123,800.00
ALFALFA	8,012.00	100.00	801,200.00

<b>TOTAL</b>	<b>148,253.60</b>		<b>33,027,790.00</b>
--------------	-------------------	--	----------------------

**2023**

<b>CULTIVO</b>	<b>SUPERFICIE (HAS)</b>	<b>CANTIDAD FS (KG/HA)</b>	<b>CANTIDAD TOTAL FS(KG/AÑO)</b>
MAIZ	85,707.90	250.00	21,426,975.00
FRIJOL	17,013.40	100.00	1,701,340.00
SORGO	353.47	300.00	106,041.00
AVENA	4,457.10	150.00	668,565.00
CEBADA	2,935.00	150.00	440,250.00
TRIGO	282.00	200.00	56,400.00
ALFALFA	6,938.50	100.00	693,850.00
<b>TOTAL</b>	<b>117,687.37</b>		<b>25,093,421.00</b>

Cuadro 25. Hoja 4-5.1 Emisiones directas de óxido nitroso de campos agrícolas

<b>MODULO</b>		<b>AGRICULTURA</b>		
<b>SUBMODULO</b>		<b>SUELOS AGRÍCOLAS</b>		
<b>HOJA DE TRABAJO</b>		<b>4-5</b>		
<b>PARTE</b>		<b>1 DE 5 EMISIONES DIRECTAS DE OXIDO NITROSO DE CAMPOS AGRÍCOLAS, EXCLUYENDO EL CULTIVO EN HISTOSOLES</b>		
Tipo de N agregado al suelo		<b>PASO 1</b>		<b>PASO 2</b>
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
		Cantidad de entrada de N (kg N/año)	Factor de emisiones directas EF <sub>1</sub> (kg N <sub>2</sub> O–N/kg N)	Emisiones directas del suelo (Gg N <sub>2</sub> O–N/año)
<b>2006</b>	Fertilizante sintético (F <sub>SN</sub> )	29,725,011.00	0.0125	0.371562638
	Estiércol (F <sub>AW</sub> )	35,285,387.12	0.0125	0.441067339
	Cultivos fijadores de N (F <sub>BN</sub> )	31,025.42	0.0125	0.000387818
	Residuos de Cultivo (F <sub>CR</sub> )	18,655.67	0.0125	0.000233196
	<b>TOTAL</b>			
<b>2023</b>	Fertilizante sintético (F <sub>SN</sub> )	22,584,078.90	0.0125	0.282300986
	Estiércol (F <sub>AW</sub> )	43,569,317.69	0.0125	0.544616471
	Cultivos fijadores de N (F <sub>BN</sub> )	5,980.37	0.0125	7.47546E-05
	Residuos de Cultivo (F <sub>CR</sub> )	11,253.53	0.0125	0.000140669
	<b>TOTAL</b>			

Anotar el  $F_{SN}$  en la columna A de la hoja de trabajo 4-5, parte 1. (Cuadro 25).

$$2006. F_{SN} = 33,027,790 \times (1 - 0.1) =$$

29,725,011 Kg de Fertilizante Sintético al año

$$2023. F_{SN} = 25,093,421 \times (1 - 0.1) =$$

22,584,078.9 Kg de Fertilizante Sintético al año

Después se prosigue a calcular el nitrógeno procedente del estiércol, y para ello se ponen las cabezas por tipo de ganado producidas en el Estado y otros factores sacados de los cuadros 9 y 10, por lo que se hizo un cuadro para hacer los cálculos (Cuadro 26).

Cuadro 26. Producción en el Estado de Querétaro por Tipo de Ganado (2006 Y 2023).

2006

GANADO	BOVINO		PORCINO	OVINO	AVES	OTROS
	CARNE	LECHE				
Cantidad	218,735.00	77,167.00	353,515.00	152,070.00	28,921,043.00	156,322.00
Nex(kg/an/año)	40.00	70.00	16.00	12.00	0.60	40.00
SME(%)	0.99	0.36	0.00	1.00	0.42	0.99
FE <sub>3</sub> (SME)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
TOTAL	173,238.12	38,892.17	0.00	36,496.80	145,762.06	123,807.02
NexSME	8,661,906.00	1,944,608.40	0.00	1,824,840.00	7,288,102.84	6,190,351.20
Nex	8,749,400.00	5,401,690.00	5,656,240.00	1,824,840.00	17,352,625.80	6,252,880.00

2023

GANADO	BOVINO		PORCINO	OVINO	AVES	OTROS
	CARNE	LECHE				
Cantidad	240,055.00	119,940.00	357,512.00	150,616.00	44,308,926.00	93,679.00
Nex(kg/an/año)	40.00	70.00	16.00	12.00	0.60	40.00
SME(%)	0.99	0.36	0.00	1.00	0.42	0.99
FE <sub>3</sub> (SME)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
TOTAL	190,123.56	60,449.76	0.00	36,147.84	223,316.99	74,193.77
NexSME	9,506,178.00	3,022,488.00	0.00	1,807,392.00	11,165,849.35	3,709,688.40
Nex	9,602,200.00	8,395,800.00	5,720,192.00	1,807,392.00	26,585,355.60	3,747,160.00

$$2006. N_{EX} = \sum N_{EX} = 45,237,675.8 \text{ N total excretado por los animales (kg N/año)}$$

$$2023. N_{EX} = \sum N_{EX} = 55,858,099.60 \text{ N total excretado por los animales (kg N/año)}$$

Utilizando la hoja de trabajo 4-5 A (Adicional) (Cuadro 27) para calcular el nitrógeno del estiércol utilizado como fertilizante, haciendo la corrección correspondiente a las emisiones de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> y excluyendo el estiércol producido durante el proceso. Anotar en la columna A, el total de nitrógeno excretado, N<sub>EX</sub>.

Cuadro 27. Hoja de trabajo 4-5 (Adicional). Nitrógeno del estiércol utilizado.

MODULO		AGRICULTURA				
SUBMODULO		SUELOS AGRICOLAS				
HOJA DE TRABAJO		4-5A (ADICIONAL)				
PARTE		1 DE 1 NITRÓGENO DEL ESTIÉRCOL UTILIZADO				
A	B	C	D	E	F	
Total de N excretado (kg N/año)	Fracción del N quemado como combustible	Fracción del nitrógeno excretado durante el pastoreo	Fracción del N excretado emitido como NO <sub>x</sub> y NH <sub>3</sub>	Suma	Nitrógeno del estiércol utilizado (corregido para las emisiones de NO <sub>x</sub> y NH <sub>3</sub> ) F <sub>AW</sub> (kg N/año)	
<b>2006</b>	45,237,675.80	0	0.02	0.2	0.78	35,285,387.12
<b>2023</b>	55,858,099.60	0	0.02	0.2	0.78	43,569,317.69

En la Columna B se puso la fracción del nitrógeno quemado como combustible, Frac<sub>COMB</sub>, la cual se sacó del Cuadro 12. En la columna C, va, la fracción de nitrógeno excretado durante el pastoreo, Frac<sub>PAST</sub>, que se sacó del Cuadro 20. En la columna D se pone la fracción del nitrógeno excretado emitido como NO<sub>x</sub> y NH<sub>3</sub>, Frac<sub>GASM</sub>, se sacó del Cuadro 12. La columna E es la suma de las columnas B, C y D menos la unidad. Y la columna F es la multiplicación de la A por la E y es el nitrógeno del estiércol utilizado (realizada la corrección para dar cuenta de las

emisiones de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> y excluyendo el estiércol producido durante el pastoreo). Esta se anota en la columna A de la hoja 1 de la hoja de trabajo 4-5 (Cuadro 25). Para hacer el cálculo del aporte total de nitrógeno en cultivos fijadores del nitrógeno se debe de tomar en cuenta la producción de toneladas de los cultivos en el estado de Querétaro (Cuadro 28). Y posteriormente agruparlos en cultivos fijadores de nitrógeno (legumbres y soya) y no fijadores de nitrógeno (Cuadro 29).

Cuadro 28. Producción de toneladas de cultivos en el estado de Querétaro, DGSIAF (2006 Y 2023).

<b>PRODUCCION(TON)</b>		
<b>CULTIVO</b>	<b>2006</b>	<b>2023</b>
MAIZ GRANO	189,430.12	240,273.72
MAIZ EN VERDE	177,292.00	640,332.78
SORGO GRANO	63,970.00	1,507.42
AVENA EN VERDE	59,819.90	115,488.98
SORGO EN VERDE	10,625.00	6,338.42
CEBADA GRANO	5,856.00	18,366.78
FRIJOL	5,827.01	1,453.77
CEBADA EN VERDE	1,868.00	0.00
TRIGO GRANO	1,439.00	1,391.96
TRIGO VERDE	575.00	0.00
GARBANZO GRANO	4.00	53.40
ALFALFA VERDE	601,481.50	115,488.98
<b>TOTAL</b>	<b>1,118,187.53</b>	<b>1,140,696.21</b>

Cuadro 29. Toneladas de cultivos fijadores, no fijadores en el estado de Querétaro y biomasa seca (2006 Y 2023).

2006	CULTIVO	PRODUCCION(TON)	P.SECA (TON)
	Fijadores de N seco	5,831.01	5,831.01
	Fijadores de N verde	601,481.50	511,259.28
	No Fijador seco	260,695.12	260,695.12
	No Fijador verde	250,179.90	212,652.92
2023	CULTIVO	PRODUCCION(TON)	P.SECA (TON)
	Fijadores de N seco	1,507.17	1,507.17
	Fijadores de N verde	115,488.98	98,165.63
	No Fijador seco	261,539.88	261,539.88
	No Fijador verde	762,160.18	647,836.15

Posteriormente se hace el cálculo del aporte total de nitrógeno en cultivos fijadores del nitrógeno ( $F_{BN}$ ) a partir de la producción de legumbres secas utilizando la siguiente fórmula:

$$2006 \quad F_{BN} = 2 \times CULTIVO_{BF} \times FRAC_{NCRBF} = 2 \times 517,090.285 \frac{kg}{año} \times 0.03 = 31,025.4171 \frac{kg}{año}$$

$$2023 \quad F_{BN} = 2 \times CULTIVO_{BF} \times FRAC_{NCRBF} = 2 \times 99,672.803 \frac{kg}{año} \times 0.03 = 5,980.37 \frac{kg}{año}$$

En los datos que no se tienen los datos de la biomasa seca, multiplicas por (1-0.15) para dar cuenta del contenido de humedad (Cuadro 29).

Después se calcula el aporte de nitrógeno de los residuos de las cosechas ( $F_{RC}$ ) en kg N/año, con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
2006. F_{RC} &= 2 \times [Cultivo_0 \times Frac_{NCR0} + Cultivo_{BF} \times Frac_{NCRBF}] \times (1 - Frac_R) \\
&\times (1 - Frac_{QUEM}) \\
&= 2 \times [(473,348.035 Kg \times 0.015) + (517,090.285 kg \times 0.03)] \\
&\times (1 - 0.45) \times (1 - 0.25) = 18,655.67 kg N/año
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
2023. F_{RC} &= 2 \times [Cultivo_0 \times Frac_{NCR0} + Cultivo_{BF} \times Frac_{NCRBF}] \times (1 - Frac_R) \\
&\times (1 - Frac_{QUEM}) \\
&= 2 \times [(909,376.03Kg \times 0.015) + (99,672.803 kg \times 0.03)] \times (1 - 0.45) \\
&\times (1 - 0.25) = 11,253.53 kg N/año
\end{aligned}$$

En la cual, las fracciones se sacan del Cuadro 12, en el que, el Cultivo<sub>0</sub>, es la producción de cultivos no fijadores del nitrógeno, el Cultivo<sub>BF</sub> es la producción de legumbres secas.

Posteriormente, se ocupa la hoja de trabajo 4-5B (adicional), Cuadro 30, para calcular el aporte de nitrógeno correspondiente a los residuos de las cosechas. Indicar en la columna A la producción de cultivos no fijadores del nitrógeno, Cultivo<sub>0</sub>. En la B y la D, se ponen los datos del Cuadro 7. En la C se pone la producción de cultivos fijadores de nitrógeno en biomasa seca (Cuadro 29). En la Columna E y F se hace la operación que se indica y en la columna G se pone el resultado F<sub>CR</sub>.

Cuadro 30. Hoja 4-5B (Adicional) Entrada de N por residuos de cultivos.

MODULO		AGRICULTURA					
SUBMODULO		SUELOS AGRÍCOLAS					
HOJA DE TRABAJO		4-5B (ADICIONAL)					
PARTE		1 DE 1 ENTRADA DE NITRÓGENO POR RESIDUOS DE LOS CULTIVOS					
A	B	C	D	E	F	G	
Producción de cultivos no fijadores de nitrógeno (kg biomasa seca/año)	Fracción de nitrógeno de los cultivos no fijadores de nitrógeno (kg N/kg biomasa seca)	Producción de legumbres y soya (kg biomasa seca/año)	Fracción de N en cultivos fijadores de nitrógeno ( kg N/kg biomasa seca)	Uno menos la fracción de residuos de cultivos retirados del campo	Uno menos la fracción de residuos de cultivos quemados	Nitrógeno agregado de los residuos de cultivos $F_{CR}$ (kg N/año)	
<b>2006</b>	473,348.04	0.015	517,090.29	0.03	0.55	0.75	18,655.67
<b>2023</b>	909,376.03	0.015	99,672.80	0.03	0.55	0.75	13,720.43

PASO 2 - Estimación de las emisiones directas de óxido nitroso excluido el cultivo de los histosoles.

Posteriormente se llena la hoja 4-5 parte 1, Cuadro 25, donde se estiman las emisiones directas de óxido nitroso excluido el cultivo de los histosoles, en la columna A se registran los datos obtenidos anteriormente de fertilizante sintético, estiércol, cultivos fijadores de nitrógeno y los residuos de cultivo, y en la columna B los factores de emisión para las emisiones directas sacados del Cuadro 14. Multiplicar la Columna A por la B para sacar C y multiplicar el resultado final por  $10^{-6}$  para expresarlo en gigagramos.

PASO 3- Estimación de las emisiones directas de  $N_2O$  procedentes del cultivo de los histosoles (Cuadro 31).

El estado no tiene de este tipo de suelo, por lo que en la columna D, E y F, van en ceros. Y la columna G se pone el total de las emisiones de óxido nitroso que se

sacaron en la Hoja anterior, y se multiplica por 44/28 debido a la relación del peso molecular indicadas para el N<sub>2</sub>O.

Cuadro 31. Hoja 4-5.2 Emisiones directas de óxido nitroso de histosoles.

MODULO	AGRICULTURA			
SUBMODULO	SUELOS AGRÍCOLAS			
HOJA DE TRABAJO	4-5			
PARTE	2 DE 5 EMISIONES DIRECTAS DE OXIDO NITROSO DE HISTOSOLES CULTIVADOS			
	PASO 3		PASO 4	
	D	E	F	G
	Superficie cultivada de suelos orgánicos F <sub>OS</sub> (ha)	Factor de emisión de las emisiones directas del suelo EF <sub>2</sub> (kg N <sub>2</sub> O–N/ha/año)	Emisiones directas de Histosoles (Gg N <sub>2</sub> O–N/año)	Total de emisiones directas de N <sub>2</sub> O (Gg)
<b>2006</b>	0	0	0	1.277965842
<b>2023</b>	0	0	0	1.29955919

PASO 4- Estimación del total de emisiones directas de N<sub>2</sub>O (Cuadro 31).

Las emisiones directas de N<sub>2</sub>O se calculan sumando los dos totales de las columnas C y F y multiplicar el resultado por la relación de conversión 44/28 para obtener el total de las emisiones directas de N<sub>2</sub>O. Indicar el resultado en la columna G.

PASO 5- Estimación de las emisiones de N<sub>2</sub>O de los suelos procedentes del pastoreo de animales.

En este punto se indican solamente las emisiones procedentes de praderas y pastizales. Las emisiones de N<sub>2</sub>O correspondientes a otros sistemas de manejo del estiércol se consignan en el rubro manejo del estiércol. Las emisiones de N<sub>2</sub>O procedentes del pastoreo de animales (N<sub>2</sub>O<sub>ANIMALES</sub> en kg N/año) se calcularon en el Cuadro 26. Se utiliza la hoja de trabajo 4-5 parte 3 (Cuadro 32). En la columna A

se pone el valor del nitrógeno excretado del Cuadro 27. En la columna B se pone el Factor de emisión  $FE_3$ , indicado en el Cuadro 14. Multiplicar  $N_{EX(SME)}$  (columna A) por el factor de emisión (columna B) y a continuación por la relación de conversión 44/28 a fin de obtener las emisiones de óxido nitroso procedentes del pastoreo de animales. Multiplicar el resultado final por  $10^{-6}$  para expresarlo en gigagramos. Indicar el resultado en la columna C.

Cuadro 32. Hoja de trabajo 4-5.3 Emisiones de óxido nitroso del suelo procedente del pastoreo de animales en praderas y pastizales.

MODULO		AGRICULTURA		
SUBMODULO		SUELOS AGRÍCOLAS		
HOJA DE TRABAJO		4-5		
PARTE		3 DE 5 EMISIONES DE OXIDO NITROSO DEL SUELO PROCEDENTE DEL PASTOREO DE ANIMALES - PRADERAS Y PASTIZALES		
PASO 5				
		A	B	C
Sistema de manejo de estiércol (SME)		Nitrógeno excretado $N_{EX(SME)}$ (kg N/año)	Factor de emisión SME $EF_3$ (kg $N_2O$ - N/kg N)	Emisiones de $N_2O$ por el pastoreo de animales (Gg)
<b>2006</b>	Praderas y pastizales	25,909,808.44	0.02	0.814308265
<b>2023</b>	Praderas y pastizales	29,211,595.75	0.02	0.918078724

PASO 6. Estimación de las emisiones indirectas procedentes de la deposición atmosférica de  $NH_3$  y  $NO_x$  (Cuadro 33).

Indicar en la columna A la cantidad total de N en el fertilizante sintético aplicado a los suelos  $N_{(Fert)}$ . Anotar en la columna B la fracción de N en el fertilizante sintético aplicado que se volatiliza ( $Frac_{GASFS}$ ). Multiplica A por B para tener la cantidad total de fertilizante sintético aplicado a los suelos que se volatiliza. Indicar el resultado en

la columna C. Anotar la excreción total de N por el ganado ( $N_{EX}$ ) calculada empleando la ecuación 3 en la columna D. Anotar en la columna E la fracción del total de N excretado en el estiércol que se volatiliza ( $Frac_{GASM}$ ). Multiplicar D por E y poner en F. Indicar en la columna G el factor de emisión  $FE_4$ , utilizando los valores del Cuadro 14. Sumar las columnas C y F y seguidamente multiplicar por el Factor de Emisión  $FE_4$ , (columna G) a fin de obtener las emisiones de óxido nitroso. Multiplicar el resultado final por  $10^{-6}$  para expresarlo en gigagramos. Indicar el resultado en la columna H.

Cuadro 33. Hoja de trabajo 4-5.4 Emisiones indirectas procedentes de la deposición atmosférica de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>.

MODULO		AGRICULTURA							
SUBMODULO		SUELOS AGRÍCOLAS							
HOJA DE TRABAJO		4-5							
PARTE		4 DE 5 EMISIONES DIRECTAS DE OXIDO NITROSO DE LA DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA DE NH <sub>3</sub> Y NO <sub>x</sub>							
		PASO 6							
TIPO DE DEPOSICIÓN		A	B	C	D	E	F	G	H
		N en el fertilizante sintético aplicado a los suelos N <sub>FERT</sub> (kg N/año)	Fracción del N en el fertilizante sintético aplicado que se volatiliza Fra <sub>CGASFS</sub> (kg N/kg N)	Cantidad de N en el fertilizante sintético aplicado que se volatiliza (kg N/kg N)	Total de N excretado por el ganado N <sub>EX</sub> (kg N/año)	Fracción del total de N en el estiércol excretado que se volatiliza Fra <sub>CGASM</sub> (kg N/kg N)	Total N excretado por el ganado que se volatiliza (kg N/kg N)	Factor de emisión EF <sub>4</sub> (kg N <sub>2</sub> O–N/kg N)	Emisiones de óxido nitroso (Gg N <sub>2</sub> O–N/año)
<b>2006</b>	<b>TOTAL</b>	33,027,790.00	0.1	3,302,779.00	45,237,675.80	0.2	9,047,535.16	0.01	0.12350314
<b>2023</b>	<b>TOTAL</b>	25,093,421.00	0.1	2,509,342.10	55,858,099.60	0.2	11,171,619.92	0.01	0.13680962

PASO 7 – Estimación de las emisiones indirectas procedentes de la lixiviación (Cuadro 34).

Anotar en la columna I la cantidad total de fertilizante utilizado  $N_{(FERT)}$ . Indicar en la columna J el total de N excretado por el ganado ( $N_{EX}$ ). Anotar en la columna K la fracción de N lixiviado,  $Fra_{CLIX}$ , utilizando los valores por defecto presentados en el Cuadro 12. Indicar en la columna L el factor de emisión  $FE_5$ . Utilice los valores por defecto presentados en el Cuadro 14. Sumar la cantidad total de fertilizante sintético utilizado en el país  $N_{(FERT)}$  (columna I) a  $N_{EX}$  (columna J). Multiplicar el resultado por  $Fra_{CLIX}$  (columna K) y a continuación por  $FE_5$  (columna L) a fin de obtener las emisiones indirectas de óxido nitroso procedentes de la lixiviación. Multiplicar el resultado final por  $10^{-6}$  para expresarlo en gigagramos. Indicar el resultado en la columna M.

Cuadro 34. Hoja de trabajo 4-5.4 Emisiones indirectas de  $N_2O$  procedentes de la lixiviación.

MODULO		AGRICULTURA						
SUBMODULO		SUELOS AGRÍCOLAS						
HOJA DE TRABAJO		4-5						
PARTE		5 DE 5 EMISIONES INDIRECTAS DE OXIDO NITROSO PROCEDENTES DE LA LIXIVIACIÓN						
		PASO 7				PASO 8	PASO 9	
		I	J	K	L	M	N	O
		Fertilizante sintético usado $N_{FERT}$ (kg N/año)	Nitrógeno de la excreta del ganado $N_{EX}$ (kg N/año)	Fracción de N lixiviado $Fra_{CLEAC}$ (kg N/kg N)	Factor de emisión $EF_5$	Emisiones de óxido nitroso de la lixiviación (Gg $N_2O-N/año$ )	Total de emisiones indirectas de óxido nitroso (Gg $N_2O/año$ )	Total de emisiones de óxido nitroso (Gg)
<b>2006</b>	<b>TOTAL</b>	33,027,790.00	45,237,675.80	0.3	0.025	0.58699099	1.116490784	3.21
<b>2023</b>	<b>TOTAL</b>	25,093,421.00	55,858,099.60	0.3	0.025	0.6071364	1.169058039	3.39

PASO 8 - Estimación de las emisiones indirectas

Las emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O (kg/año) pueden calcularse en la hoja de trabajo 4-5, parte 1 (deposición atmosférica) y 2 (lixiviación y escorrentía) empleando la ecuación siguiente:

$$N_2O_{INDIRECTAS} = N_2O_{(G)} + N_2O_{(L)}$$

$$\begin{aligned} N_2O_{(G)} &= (N_{FERT} \times Frac_{GASF} + N_{EX} Frac_{GASM}) \times FE_4 \\ &= \left( 33,027,790 \frac{kg}{año} \times 0.1 + 45,237,675.8 \frac{kg}{año} \times 0.2 \right) \times 0.01 \\ &= 123,503.1416 \text{ kg } N_2O - N/año \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_2O_{(L)} &= (N_{FERT} + N_{EX}) \times Frac_{LIX} \times FE_5 = \left( 33,027,790 \frac{kg}{año} + 45,237,675.8 \frac{kg}{año} \right) \times \\ &0.3 \frac{KgN}{kg} \times 0.025 \frac{KgN_2O}{kg} = 586,990.9935 \text{ kg } N_2O - N/año \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2006. N_2O_{INDIRECTAS} &= 123,503.1416 \text{ kg} + 586,990.9935 \text{ kg} = \\ &0.7104941351 \text{ Gg } N_2O - N/año \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_2O_{(G)} &= (N_{FERT} \times Frac_{GASF} + N_{EX} Frac_{GASM}) \times FE_4 \\ &= \left( 25,093,421 \frac{kg}{año} \times 0.1 + 55,858,099.60 \frac{kg}{año} \times 0.2 \right) \times 0.01 = \\ &= 136,809.6202 \text{ kg } N_2O - N/año \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_2O_{(L)} &= (N_{FERT} + N_{EX}) \times Frac_{LIX} \times FE_5 = \left( 25,093,421 \frac{kg}{año} + 55,858,099.60 \frac{kg}{año} \right) \times \\ &0.3 \frac{KgN}{kg} \times 0.025 \frac{KgN_2O}{kg} = 607,136.4045 \text{ kg } N_2O - N/año \end{aligned}$$

$$2023. N_2O_{INDIRECTAS} = 136,809.6202 \text{ kg} + 607,136.4045 \text{ kg} = \\ 0.7439460247 \text{ Gg } N_2O - N/\text{año}$$

Sumar los dos totales en las columnas H y M y seguidamente multiplicar por la relación de conversión 44/28 para obtener el total de emisiones indirectas de óxido nitroso. Indicar el resultado en la columna N.

PASO 9- Total de emisiones de N<sub>2</sub>O procedentes de los suelos agrícolas

El total de emisiones de óxido nitroso procedentes de los suelos agrícolas puede calcularse sumando las emisiones directas (hojas de trabajo 4-5, parte 2, paso 4), las emisiones correspondientes al estiércol (hoja de trabajo 4-5, parte 3, paso 5) y las emisiones indirectas (hoja de trabajo 4-5, parte 5, paso 8). En consecuencia:

El total de las emisiones de N<sub>2</sub>O – N de un país (kg N<sub>2</sub>O-N/año) puede calcularse con la ecuación siguiente:

$$N_2O = N_2O_{DIRECTAS} + N_2O_{INDIRECTAS} + N_2O_{ANIMALES}$$

Sumar los totales en la columna G (hoja de trabajo 4-5, parte 2, paso 4), la columna C (hoja de trabajo 4-5, parte 3, paso 5) y la columna N (hoja de trabajo 4-5, parte 5, paso 8) a fin de obtener el total de emisiones de óxido nitroso procedentes de los suelos agrícolas. Indicar el resultado en la columna O (Cuadro 34).

En el Cuadro 35 se concentraron las emisiones directas e indirectas en Gg de N<sub>2</sub>O de los suelos agrícolas y se convirtieron en Gg de CO<sub>2</sub> equivalente multiplicando por el potencial de calentamiento que corresponde a 310 como se indica en el Cuadro 1 y en el Cuadro 36 se indican las emisiones en Gg de CO<sub>2</sub> equivalente de la quema de residuos agrícolas.

Cuadro 35. Emisiones en Gg de CO<sub>2</sub> equivalente de los suelos agrícolas en el estado de Querétaro

2006				
Tipo de Emisión	Actividad	Emisiones de N <sub>2</sub> O en Gg	Emisiones de N <sub>2</sub> O en Gg	Gg O <sub>2</sub> eq
Directas	Cultivos Fijadores de nitrógeno	0.0006	2.0923	648.60
	Manejo de estiércol	0.6931		
	Aplicación de Fertilizante Sintético	0.5839		
	Residuos de Cosechas	0.0004		
	Pastoreo de Animales	0.8143		
Indirectas	Deposición atmosférica de NH <sub>3</sub> y NO <sub>x</sub>	0.1941	5.24	1,623.89
	Lixiviación	5.0443		
<b>TOTAL</b>		<b>7.3306</b>	<b>7.3306</b>	<b>2,272.50</b>

2023				
Tipo de Emisión	Actividad	Emisiones de N <sub>2</sub> O en Gg	Emisiones de N <sub>2</sub> O en Gg	Gg CO <sub>2</sub> eq
Directas	Cultivos Fijadores de nitrógeno	0.0001	2.2179	687.54
	Manejo de estiércol	0.8558		
	Aplicación de Fertilizante sintético	0.4436		
	Residuos de Cosechas	0.0002		
	Pastoreo de Animales	0.9181		
Indirectas	Deposición atmosférica de NH <sub>3</sub> y NO <sub>x</sub>	0.2150	5.54	1,718.06
	Lixiviación	5.3271		
<b>TOTAL</b>		<b>7.7600</b>	<b>7.7600</b>	<b>2,405.60</b>

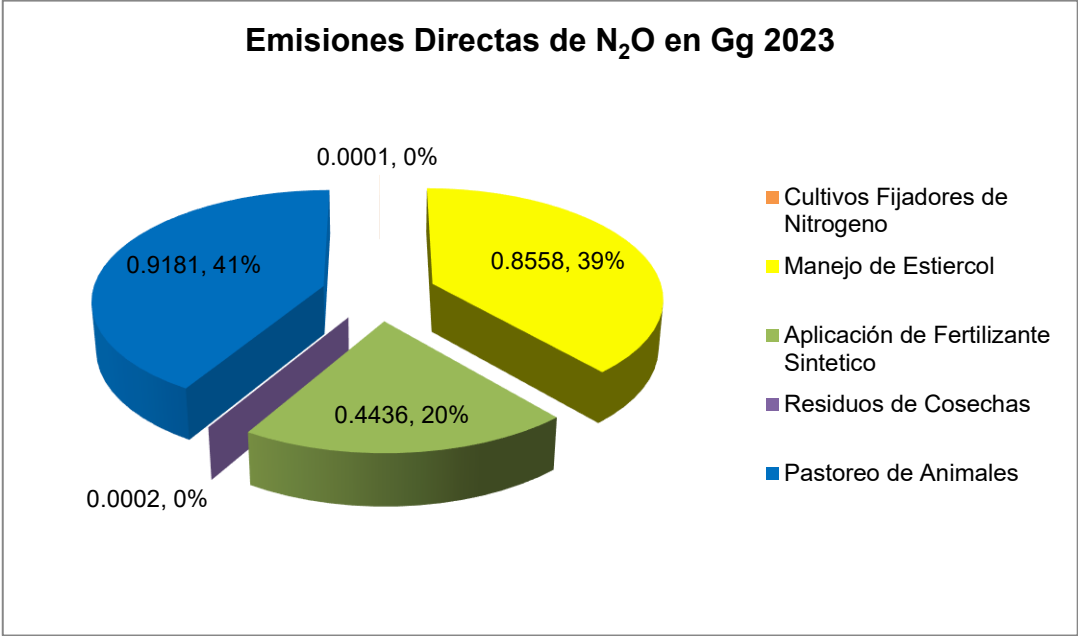
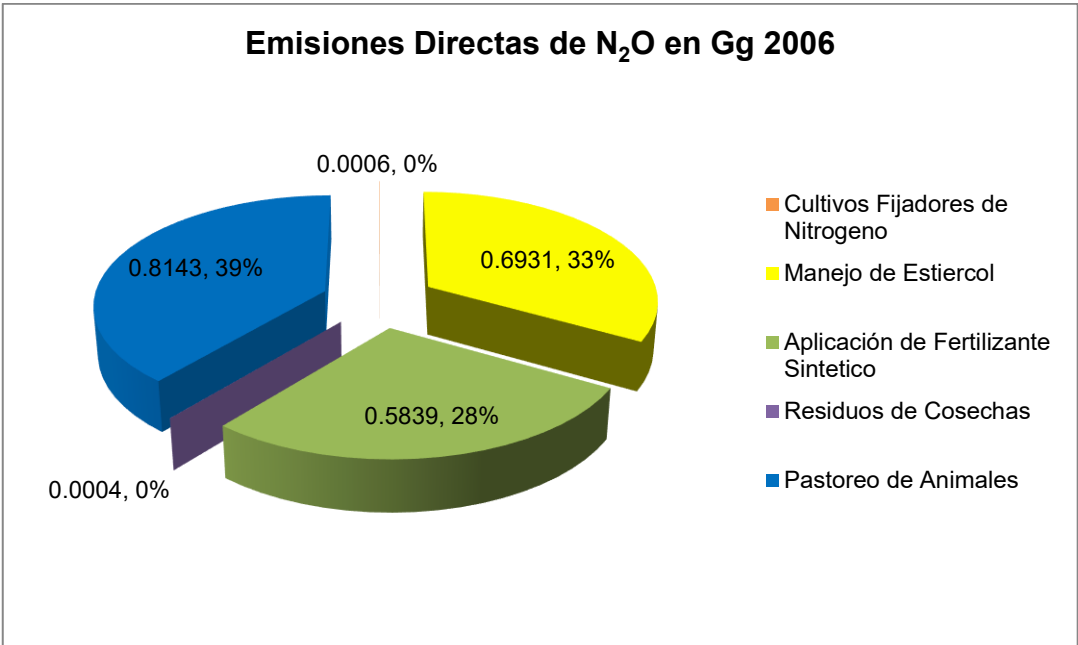


Figura 2. Emisiones Directas de N<sub>2</sub>O del suelo agrícola del Estado de Querétaro 2006 y 2023.

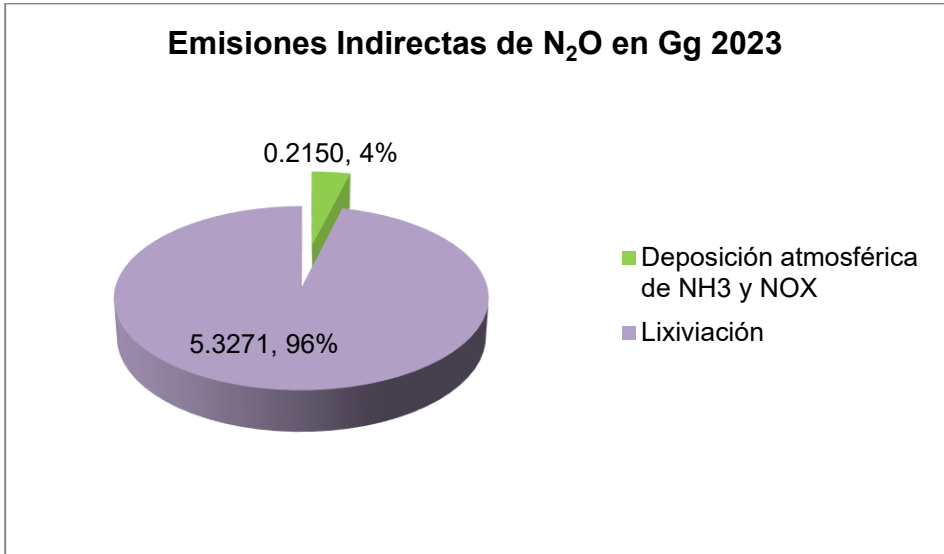
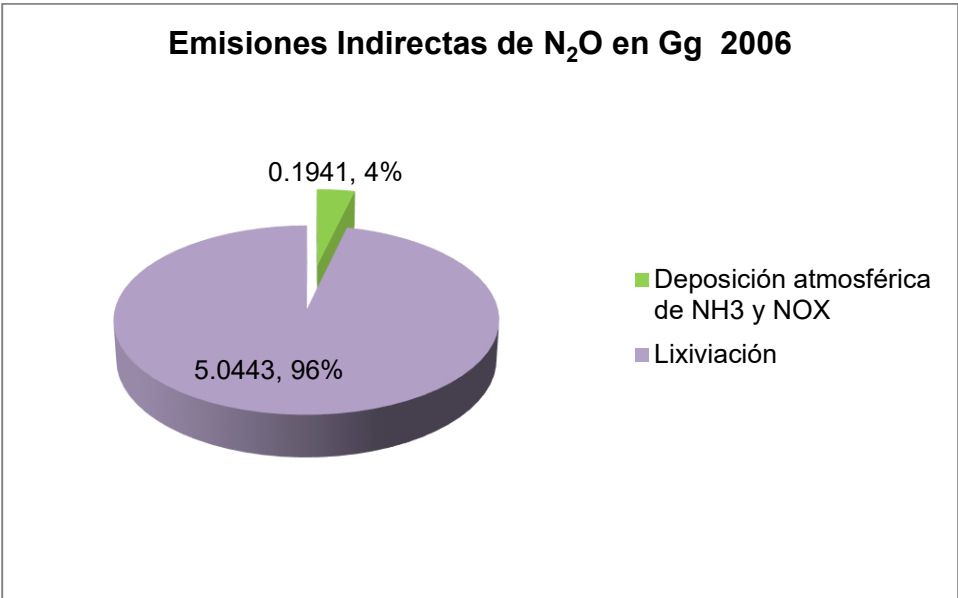


Figura 3. Emisiones Indirectas de N<sub>2</sub>O del suelo agrícola del Estado de Querétaro 2006 y 2023.

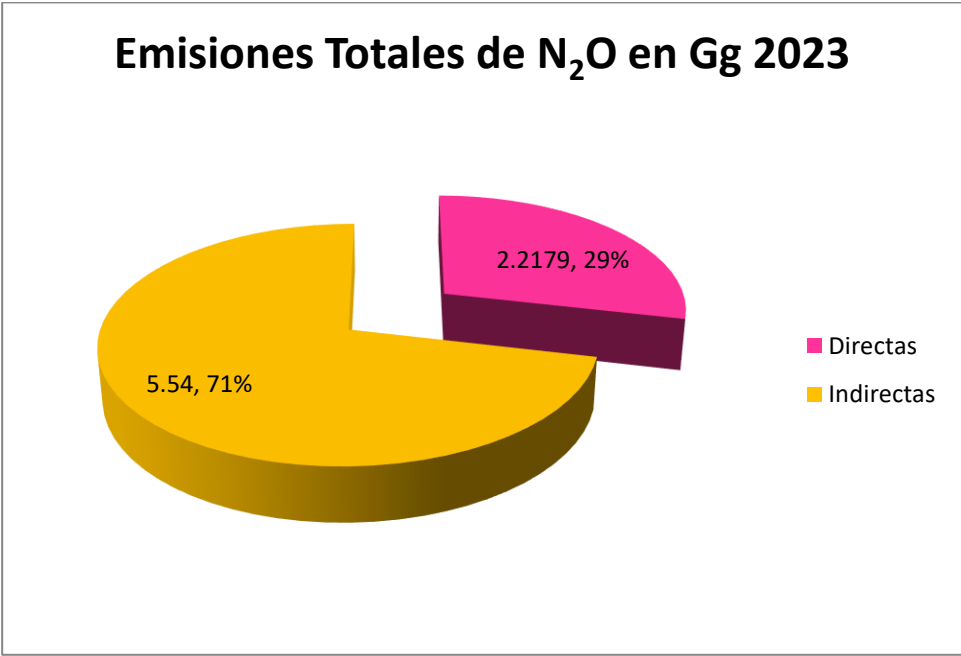
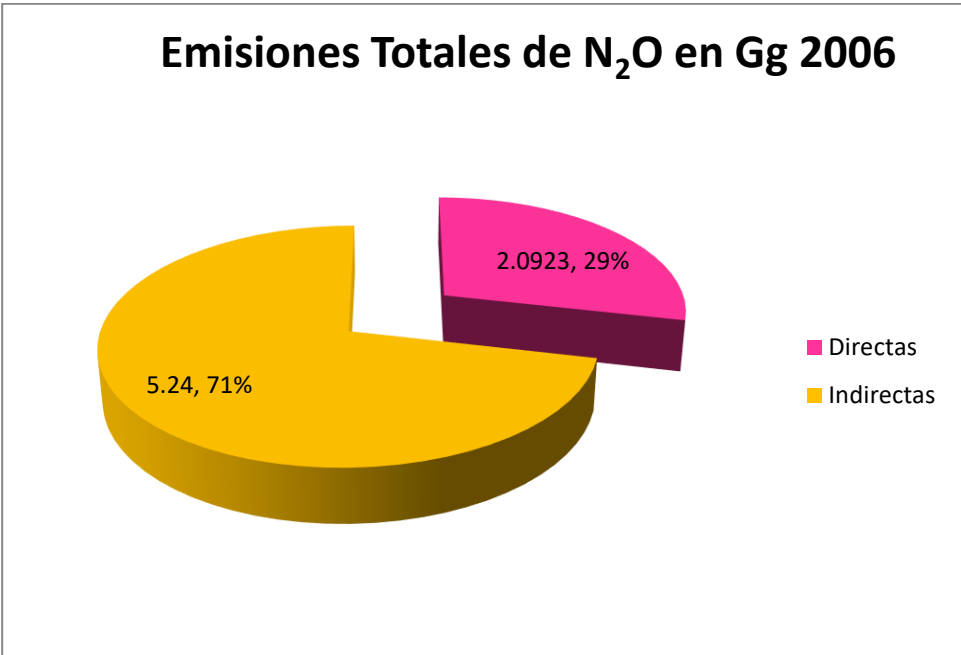


Figura 4. Emisiones Indirectas de N<sub>2</sub>O del suelo agrícola del Estado de Querétaro 2006 y 2023

Cuadro 36. Emisiones en Gg de CO<sub>2</sub> equivalente proveniente de la quema de residuos agrícolas en el estado de Querétaro (2006 Y 2023).

2006			
Compuesto	Emisiones procedentes de la quema en el campo de residuos agrícolas (Gg)	Potencial de Calentamiento	Gg CO <sub>2</sub> equivalente
CH <sub>4</sub>	0.0026	21	0.055477028
CO	0.0555	1	0.055477028
N <sub>2</sub> O	0.0001	310	0.016215143
NO <sub>x</sub>	0.0019	310	0.586061589
<b>TOTAL</b>			<b>0.713230788</b>

2023			
Compuesto	Emisiones procedentes de la quema en el campo de residuos agrícolas (Gg)	Potencial de Calentamiento	Gg CO <sub>2</sub> equivalente
CH <sub>4</sub>	0.0053	21	0.110304136
CO	0.1103	1	0.110304136
N <sub>2</sub> O	0.0001	310	0.032240323
NO <sub>x</sub>	0.0038	310	1.165257394
<b>TOTAL</b>			<b>1.418105989</b>

Cuadro 37. Emisiones en Gg de CO<sub>2</sub> del sector agrícola en el estado de Querétaro (2006 Y 2023).

<b>2006</b>	
<b>Actividad</b>	<b>Gg CO<sub>2</sub> equivalente</b>
Quema de residuos Agrícolas	0.713230788
Suelos Agrícolas	2,272.497198
<b>TOTAL</b>	<b>2,273.210428</b>

<b>2023</b>	
<b>Actividad</b>	<b>Gg CO<sub>2</sub> equivalente</b>
Quema de residuos Agrícolas	1.418105989
Suelos Agrícolas	2,405.60
<b>TOTAL</b>	<b>2,407.0145</b>

Como podemos observar en el Cuadro 37, encontramos las emisiones totales en Gg de CO<sub>2</sub> del sector agrícola en el estado de Querétaro.

## 7. DISCUSIÓN

La estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector agrícola del estado de Querétaro para los años 2006 y 2023 permite analizar la evolución temporal de las principales fuentes emisoras y su contribución relativa al total del sector. Los resultados obtenidos reflejan las características productivas del estado, así como la influencia del manejo del nitrógeno en los suelos agrícolas como factor determinante en la generación de emisiones.

De acuerdo con el Cuadro 37, las emisiones totales del sector agrícola aumentaron de 2,273.21 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente en 2006 a 2,407.01 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente en 2023, lo que representa un incremento del 5.9 %. Este aumento se explica principalmente por el crecimiento de las emisiones provenientes de los suelos agrícolas, los cuales constituyen la fuente dominante de emisiones en ambos años, tal como se presenta en el Cuadro 35.

Las emisiones directas de N<sub>2</sub>O del suelo agrícola, ilustradas en la Figura 2, muestran que el pastoreo de animales, el manejo del estiércol y la aplicación de fertilizantes sintéticos son las actividades que más contribuyen a estas emisiones tanto en 2006 como en 2023. La comparación entre ambos años indica que, si bien el uso de fertilizantes sintéticos presenta variaciones, el incremento en la excreción de nitrógeno asociada al sector pecuario mantiene elevados los niveles de emisiones directas de N<sub>2</sub>O.

Por su parte, las emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O presentan un patrón consistente a lo largo del periodo de estudio. Como se observa en la Figura 3, la lixiviación del nitrógeno representa la principal vía de emisión indirecta en ambos años, superando a la deposición atmosférica de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>. Este comportamiento se confirma en la Figura 4, que muestra de manera integrada el aumento de las emisiones indirectas totales de N<sub>2</sub>O en 2023 respecto a 2006, evidenciando que las pérdidas de nitrógeno asociadas a procesos de lixiviación continúan siendo un componente clave en el balance de emisiones del suelo agrícola.

En cuanto a la quema en el campo de residuos agrícolas, aunque su contribución al total del sector es reducida, el Cuadro 36 muestra un incremento de las emisiones de 0.71 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente en 2006 a 1.42 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente en 2023. Este aumento está relacionado con cambios en la producción agrícola y con la permanencia de prácticas tradicionales de manejo de residuos en determinadas zonas del estado.

En conjunto, la comparación de los resultados para 2006 y 2023 confirma la utilidad del inventario como herramienta para identificar tendencias temporales y fuentes prioritarias de mitigación. Asimismo, pone de manifiesto la necesidad de mejorar las prácticas de manejo del nitrógeno y de fortalecer la calidad de los datos de actividad, con el fin de reducir la incertidumbre en futuras estimaciones y avanzar hacia inventarios de mayor nivel de especificidad.

## 8. CONCLUSIONES

El inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector agrícola del estado de Querétaro, elaborado con base en la metodología del IPCC (nivel 1), permitió cuantificar y comparar las emisiones correspondientes a los años 2006 y 2023, cumpliendo con el objetivo general del estudio. Los resultados evidencian un incremento del 5.9 % en las emisiones totales, pasando de 2,273.21 a 2,407.01 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente, lo que refleja una tendencia creciente en el periodo analizado. Se identificó que los suelos agrícolas constituyen la principal fuente de emisiones, debido a la generación de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), tanto en forma directa como indirecta. Estas emisiones están estrechamente relacionadas con el manejo del nitrógeno en el sistema agrícola, particularmente por la aplicación de fertilizantes sintéticos, el manejo del estiércol y el pastoreo de animales, así como por procesos de lixiviación.

En cuanto a la quema de residuos agrícolas, aunque su contribución al total de emisiones es menor, se observó un incremento significativo en el periodo de estudio, prácticamente duplicándose entre 2006 y 2023, lo que indica una persistencia de prácticas agrícolas no sostenibles en el manejo de residuos.

El análisis comparativo permitió identificar cambios en las fuentes emisoras y en las dinámicas productivas del sector, evidenciando que el incremento de las emisiones no depende únicamente del uso de fertilizantes, sino también del aumento en la actividad pecuaria y en la generación de estiércol, lo que resalta la importancia de abordar el sistema agrícola de manera integral.

Asimismo, el uso de factores de emisión por defecto (nivel 1) introduce un grado de incertidumbre en las estimaciones; sin embargo, el inventario cumple con los criterios de consistencia, comparabilidad y transparencia, constituyéndose como una línea base confiable para estudios futuros y para el desarrollo de metodologías más específicas (niveles 2 y 3).

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que las estrategias de mitigación deben centrarse prioritariamente en:

- La optimización del uso de fertilizantes nitrogenados.
- El manejo adecuado del estiércol.
- La reducción del sobrepastoreo.
- La conservación de la materia orgánica del suelo.
- La eliminación progresiva de la quema de residuos agrícolas.

Finalmente, el inventario generado constituye una herramienta técnica fundamental para la toma de decisiones, ya que permite identificar las principales fuentes de emisión, establecer prioridades de mitigación y contribuir al diseño de políticas públicas orientadas a la reducción de emisiones en el sector agrícola del estado de Querétaro.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

Baird, C. (2001). *Química ambiental* (1.<sup>a</sup> ed.). Reverté.

Bolin, B. (1998). The Kyoto negotiations on climate change: A science perspective. *Science*, 279, 330. <https://doi.org/10.1126/science.279.5347.330>

Crutzen, P. J. (1970). The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96, 320–325. <https://doi.org/10.1002/qj.49709640815>

Dickson, T. R. (2005). *Química: un enfoque ecológico* (1.<sup>a</sup> ed.). Limusa.

Dirección General de Sistemas de Información Agroalimentaria y Pesquera (DGSIAP). (2025). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Duxbury, J. M. (1994). The significance of agricultural sources of greenhouse gases. *Fertilizer Research*, 38, 151–163. <https://doi.org/10.1007/BF00748927>

Duxbury, J. M., Harper, L. A., & Mosier, A. R. (1993). Contributions of agroecosystems to global climate change. *Advances in Agronomy*, 55, 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60597-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60597-0)

Environmental Protection Agency. (2022). *Overview of greenhouse gases*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>

Fernández, A. B., & Martínez, J. (2004). *Cambio climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *Agroforestry for climate action: Enhancing resilience and mitigation*. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb2776en>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022a). *Climate-smart agriculture: Managing ecosystems for sustainable livelihoods*. <https://www.fao.org/climate-smart-agriculture>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022b). *Climate change mitigation in agriculture: Reducing emissions, enhancing sinks*. <https://www.fao.org/3/cc2429en/cc2429en.pdf>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022c). *Emissions due to agriculture: Global, regional and country trends 2000–2020*. <https://www.fao.org/3/cc1553en/cc1553en.pdf>

Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., et al. (2020). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(2), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>

High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition. (2020). *Food security and nutrition: Building a global narrative towards 2030*. <https://www.fao.org/3/ca9731en/ca9731en.pdf>

Instituto Nacional de Ecología. (2006). *México: tercera comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. S. y G. Editores.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2022a). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero 1990–2020*. <https://www.gob.mx/inecc/documentos/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2022b). *Escenarios de cambio climático para México*. <https://www.gob.mx/inecc/documentos/escenarios-de-cambio-climatico-para-mexico>

Instituto Nacional de Ecología & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2006). *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990–2002*.

Instituto Nacional de Ecología & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2008). *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 2006*.

Instituto Nacional de Ecología & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2009). *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 2009*.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (1996). *Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories* (Vol. 2). <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/spanish.htm>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Cambio climático 2007: impactos, adaptación y vulnerabilidad*. Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: the physical science basis*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: mitigation of climate change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: synthesis report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la química ambiental*. Reverté.

Martínez, T. A., & Conde, C. A. (2008). *Guía para la elaboración de programas estatales de acción ante el cambio climático (PEACC)* (3.ª ed.). INE–UNAM–UV.

Molina, M. J., & Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalyzed destruction of ozone. *Nature*, 249, 810–812. <https://doi.org/10.1038/249810a0>

Nair, P. K. R., Mohan Kumar, B., & Nair, V. D. (2021). Agroforestry systems and climate change mitigation. *Journal of Environmental Management*, 282, 111852. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111852>

Nobel Foundation. (1995). *The Nobel Prize in Chemistry 1995*. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1995/summary/>

Organización Meteorológica Mundial. (2024). *Las concentraciones de gases de efecto invernadero se disparan una vez más: nuevo récord en 2023*. <https://public.wmo.int/es/noticias/las-concentraciones-de-gases-de-efecto-invernadero-se-disparan-una-vez-mas-nuevo-record-en-2023>

Paustian, K., Larson, E., Kent, J., Marx, E., & Swan, A. (2022). Soil carbon sequestration as a biological negative emission strategy. *Frontiers in Climate*, 4, Article 1–14. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.942365>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2008). *Manejo del proceso de elaboración del inventario nacional de gases de efecto invernadero*.

Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Querétaro. (2010). *Anuario económico 2009*.

Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Querétaro. (2023). *Inventario de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero a la atmósfera del estado de Querétaro. Año base 2021*. <https://www.sedesu.queretaro.gob.mx>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero*. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, & Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2021). *Contribución determinada a nivel nacional de México: actualización 2020*. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/contribucion-determinada-a-nivel-nacional-actualizacion-2020>

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.

Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E. A., et al. (2021a). Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). *Global Change Biology*, 27(1), 1–18. <https://doi.org/10.1111/gcb.15883>

Smith, P., Haberl, H., Popp, A., Erb, K. H., Lauk, C., Harper, R., et al. (2021b). How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals? *Global Change Biology*, 27(2), 309–326. <https://doi.org/10.1111/gcb.15342>

Spiro, T. G., & Stigliani, W. M. (2007). *Química medioambiental* (2.<sup>a</sup> ed.). Pearson Prentice Hall.