



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y de los Recursos Naturales Renovables

Maestría en Biodiversidad y Cambio Climático

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN SUELOS AGRÍCOLAS Y GANADEROS MEDIANTE CÁMARAS ESTÁTICAS CERRADAS EN EL SECTOR ZALAPA, CIUDAD DE LOJA

Trabajo de Titulación previo a la obtención
del título de Magíster en Biodiversidad y
Cambio Climático.

AUTOR:

Ing. Jonny María Paccha Angamarca

DIRECTOR:

Ing. Erasmo Vinicio Alvarado Jaramillo M.Sc.

Loja- Ecuador

2023

Educamos para **Transformar**

Certificación

Loja, 18 de mayo de 2023

Ing. Vinicio Alvarado Jaramillo M.Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

C E R T I F I C O:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Emisiones de gases de efecto invernadero en suelos agrícolas y ganaderos mediante cámaras estáticas cerradas en el sector Zalapa, ciudad de Loja**, de autoría del estudiante **Jonny María Paccha Angamarca** previo a la obtención del título de **Magister en Biodiversidad y Cambio Climático, con cédula de identidad**, con cédula de ciudadanía **Nro. 1104267834**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Ing. Vinicio Alvarado Jaramillo M.Sc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Jonny María Paccha Angamarca**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional - Biblioteca Virtual.



Firma:

Autor: Ing. Jonny María Paccha Angamarca.

Cédula de Identidad: 1104267834

Fecha: 19 de mayo de 2023

Correo electrónico: jonny.paccha@unl.edu.ec

Teléfono: 0985483684

Carta de autorización por parte de la autora, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Jonny María Paccha Angamarca**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Emisiones de gases de efecto invernadero en suelos agrícolas y ganaderos mediante cámaras estáticas cerradas en el sector Zalapa, ciudad de Loja**, como requisito para optar el título de **Magíster en Biodiversidad y Cambio Climático**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los diecinueve días del mes de mayo de dos mil veintitrés.



Firma:

Autor: Jonny María Paccha Angamarca

Cédula: 1104267834

Dirección: España y Bolivia

Correo electrónico: jonny.paccha@unl.edu.ec

Teléfono: 0985483684

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Trabajo de Titulación: Ing. Vinicio Alvarado Jaramillo M.Sc.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a Dios por ser fuente de vida, salud, fortaleza, perseverancia y capacidad para culminar mis estudios universitarios.

Querida mamá Alba, papá Luis, hermanos y querida familia, quiero dedicarles estas palabras llenas de amor y agradecimiento por ser parte fundamental de mi vida y por su inquebrantable apoyo durante todo este camino de realización académica, su amor incondicional, sabiduría y sacrificio han sido pilares fundamentales en mi formación. Gracias por su constante aliento, por creer en mí y por brindarme las herramientas necesarias para enfrentar los desafíos de la vida. Su ejemplo de dedicación y esfuerzo ha sido mi mayor inspiración. A mis queridos hermanos, ustedes han sido mis compañeros de aventuras y mis confidentes. Su apoyo incondicional y ánimo constante me han dado fuerzas para perseverar en cada paso de este camino.

A mi amado esposo Vinicio Alvarado, por tu constante aliento y confianza que para mí han sido fundamentales para alcanzar este logro. Gracias por creer en mí y por ser mi compañero de vida en cada paso del camino.

A mis amada hija Hailee y mi hijo Sebastián, mis adorados hijos, su presencia llena mi vida de alegría y propósito. Ustedes son mi razón de ser y mi mayor motivación. Cada día me esfuerzo por ser un ejemplo para ustedes y construir un futuro mejor. Espero que esta tesis sea un testimonio de mi amor por ustedes y de mi deseo de brindarles un mundo lleno de oportunidades y posibilidades infinitas.

A ti, querida Celia Alvarado, mi suegra, te agradezco por tu amor y apoyo incondicional. Tu sabiduría y consejos siempre han sido valiosos para mí.

En cada página de esta tesis, llevo el recuerdo de cada uno de ustedes en mi corazón. Esta dedicación es un pequeño gesto para expresar mi profundo agradecimiento por estar a mi lado, por inspirarme y por ser mi fuerza en los momentos de dificultad. Con amor y gratitud infinitos.

Jonny María Paccha Angamarca

Agradecimiento

A los profesores de la maestría en Biodiversidad y Cambio Climático, su dedicación, conocimiento y guía han sido fundamentales para mi crecimiento y desarrollo como profesional. Agradezco su compromiso en transmitir sus conocimientos, su apertura para resolver mis dudas y su disposición para discutir ideas y enriquecer mi perspectiva.

A mi director de tesis, Vinicio Alvarado, gracias por su liderazgo, orientación y paciencia a lo largo de este proceso. Sus conocimientos expertos y su compromiso con mi crecimiento académico han sido invaluableles. Agradezco especialmente su capacidad para desafiarme y motivarme a superar mis propios límites, lo cual ha enriquecido enormemente mi trabajo.

A mis queridos compañeros de clase, su apoyo y camaradería han sido un pilar fundamental durante esta etapa. Gracias por compartir experiencias, ideas y conocimientos. Sus aportes y debates enriquecieron mi aprendizaje y me ayudaron a consolidar mis propias ideas. Aprecio enormemente nuestra colaboración y el espíritu de equipo que hemos construido juntos.

Un agradecimiento especial al padre José Bolívar Castillo por su valioso apoyo en el santuario Reyna del Cisne. Su amabilidad, disposición y generosidad al permitirme desarrollar mi trabajo de investigación en ese entorno único han sido determinantes para el éxito de esta tesis. Aprecio profundamente su compromiso con la preservación de la biodiversidad y su disposición para compartir sus conocimientos.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a todas las personas que, de alguna manera u otra, han brindado su apoyo, aliento y comprensión a lo largo de este proceso. A los directivos y administrativos de esta maestría su apoyo y comprensión han sido fundamentales para superar los desafíos y obstáculos que se presentaron en el camino.

Este logro no habría sido posible sin ustedes, y estoy sinceramente agradecido por su contribución a mi desarrollo académico y personal. Sus aportes han dejado una huella imborrable en mi trayectoria y mi aprecio hacia ustedes es infinito.

Jonny María Paccha Angamarca

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas:	ix
Índice de figuras:	x
Índice de anexos:	xi
1. Título	1
2. Resumen	2
2.1. Abstract	3
3. Introducción.	4
4. Marco teórico	7
4.1. Cambio climático	7
4.2. Gases de Efecto Invernadero (GEI)	7
4.3. Emisiones de GEI en actividades agrícolas y ganaderas	10
4.4. Extrapolación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.	12
4.5. Técnicas de cuantificación de gases de efecto invernadero en suelo.....	12
4.6. Condiciones que afectan las mediciones de GEI en suelos con cámaras cerradas	15
4.7. Sensores para la medición de gases de efecto invernadero en cámaras estáticas cerradas.	16
4.8. Impacto del efecto antrópico en las tasas de emisión	17
5. Metodología	19
5.1. Área de estudio.....	19
5.2. Metodología para el primer objetivo: Evaluar las condiciones de suelo y vegetación en el sector Zalapa.	20
5.3. Evaluación de condiciones de suelo y vegetación	21

5.4.	Metodología para el segundo objetivo: Determinar las concentraciones de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O en suelos agrícolas y ganaderos mediante cámaras estáticas cerradas en el sector Zalapa, ciudad de Loja.	22
5.5.	Cuantificación de gases de efecto invernadero en suelos agrícolas y ganaderos.....	25
6.	Resultados	28
6.1.	Evaluar las condiciones de suelo, vegetación y distribución de las áreas agrícolas y ganaderas en la periferia norte de la ciudad de Loja.....	28
6.2.	Concentraciones de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O.	30
6.3.	Estimaciones de gases de efecto invernadero para el sector Zalapa	37
7.	Discusión	39
7.1.	Características físicas y materia orgánica del el suelo	39
7.2.	Concentraciones de gases de efecto invernadero	40
7.3.	Estimaciones para la zona de estudio.....	42
8.	Conclusiones	44
9.	Recomendaciones	45
10.	Bibliografía	46
11.	Anexos	52

Índice de tablas:

Tabla 1. Análisis físico-químicos de suelos considerados en la medición GEI.	21
Tabla 2. Especificaciones para el diseño de cámaras estáticas cerradas.	23
Tabla 3. Análisis de las propiedades físicas y químicas en parcelas agrícolas y ganaderas en el sector Zalapa.....	28
Tabla 4. Cobertura y uso de suelo de la zona norte de la hoya de Loja.	29
Tabla 5. Análisis descriptivo de datos obtenidos en parcelas agrícolas en el sector de Zalapa	31
Tabla 6. Análisis descriptivo de datos obtenidos en parcelas ganaderas en el sector de Zalapa.....	31
Tabla 7. Prueba de Shapiro-Wilk para las concentraciones de GEI por parcela.....	36
Tabla 8. Flujos de gases de efecto invernadero en ton/ha/día para las parcelas agrícolas y ganadera..	38
Tabla 9. Flujos de gases de efecto invernadero en toneladas/día generados en la zona de estudio	38
Tabla 10. Flujos de gases de efecto invernadero en toneladas/año generados en la zona de estudio...	38

Índice de figuras:

Figura 1. Mapa de la periferie norte de la ciudad de Loja.....	20
Figura 2. A) Diseño de la cámara, B) Construcción de bases y tubos. C) Diseño final con los sensores instalados.....	23
Figura 3. Precalentamiento de sensores y ensamble de circuitos.	24
Figura 4. Disposición de unidades discretas para muestreo con desplazamiento de las cámaras cerradas estáticas.	25
Figura 5. Cámaras cerradas en parcela en el sector Zalapa.	26
Figura 6. Cobertura vegetal en la zona de estudio	29
Figura 7. Comparación de las Emisiones de CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, Temperatura y Humedad Relativa en parcelas agrícola y ganadera en Zalapa.	30
Figura 8. Flujos de CO ₂ en suelos agrícolas y ganaderos de diciembre 2022 a febrero 2023	32
Figura 9. Flujos de CH ₄ en suelos agrícolas y ganaderos durante diciembre 2022 a febrero 2023	33
Figura 10. Flujos de N ₂ O en suelos agrícolas y ganaderos durante diciembre 2022 a febrero 2023 ...	33
Figura 11. Variación temporal de temperatura en el interior de las cámaras cerradas	34
Figura 12. Variación temporal de humedad relativa en el interior de las cámaras cerradas	35
Figura 13. Matriz de correlación de la variables de estudio para las parcelas agrícolas y ganaderas...	36

Índice de anexos:

Anexo 1. Formato de encuesta aplicada durante los sondeos a propietarios	52
Anexo 2. Mapa de cobertura y uso de suelo de la hoya de Loja.....	54
Anexo 3. Código de calibración de sensores electroquímicos.....	54
Anexo 4. Cálculos de concentraciones en función del tiempo dC/dt	60
Anexo 5. Certificado de traducción del Abstract.....	62

1. Título

Emisiones de gases de efecto invernadero en suelos agrícolas y ganaderos mediante cámaras estáticas cerradas en el sector Zalapa, ciudad de Loja

2. Resumen

El estudio estimó las emisiones de los gases de efecto invernadero (CO_2 , N_2O , CH_4) en parcelas agrícolas y ganaderas situadas en el sector Zalapa, al norte de la ciudad de Loja. Se utilizó un enfoque tecnológico innovador, empleando cámaras cerradas estáticas de 10 L y sensores de bajo costo, ensamblados en una placa Arduino Mega 2560. Los sensores fotoquímicos MQ4 y MQ135, junto con un sensor infrarrojo MHZ-19B, se usaron para registrar las fluctuaciones de CO_2 , N_2O , CH_4 . Las mayores concentraciones de CO_2 registradas correspondieron a las parcelas ganaderas con 405 ppm, mientras que las parcelas agrícolas registraron mayores concentraciones de CH_4 con 92,45 ppm; para el N_2O las variaciones registradas fueron similares tanto en parcelas agrícolas como ganaderas con promedios de 1,96 y 2 ppm respectivamente. Las emisiones de gases de efecto invernadero no se vieron afectadas por la porosidad del suelo dado que se observaron mayores emisiones de CO_2 en parcelas ganaderas, a pesar de tener una porosidad menor que las parcelas agrícolas. Las emisiones de gases de efecto invernadero en parcelas agrícolas y ganaderas fueron monitoreadas con sensores de bajo costo, proporcionando una forma rentable de analizar las tendencias temporales de CO_2 , CH_4 y N_2O , a pesar de su precisión limitada. Finalmente, las estimaciones totales de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de Zalapa, representaron el 1,78 % de CO_2 , 0,43 % para CH_4 y el 0,5 % de N_2O de los promedios nacionales reportados por la FAO.

Palabras clave: Gases de efecto invernadero, sensores fotoquímicos, cámaras cerradas, flujos de gases del suelo.

2.1. Abstract

The study quantified greenhouse gas emissions (CO_2 , N_2O , CH_4) from agricultural and livestock parcels in the Zalapa sector, located north of Loja city. It utilized an innovative approach featuring static closed chambers of 10 L and budget-friendly sensors mounted on an Arduino Mega 2560 board. The MQ4 and MQ135 photochemical sensors, coupled with an MHZ-19B infrared sensor, were instrumental in recording the fluctuations of CO_2 , N_2O , and CH_4 . Livestock plots had the highest recorded CO_2 concentrations, registering 405 ppm. In contrast, agricultural plots exhibited elevated CH_4 concentrations, peaking at 92.45 ppm. N_2O concentrations were comparably uniform across both plot types, averaging 1.96 and 2 ppm. Interestingly, soil porosity did not impact greenhouse gas emissions, with livestock plots demonstrating higher CO_2 emissions despite having lower porosity than agricultural plots. Employing low-cost sensors allowed for an economical examination of the temporal trends of CO_2 , CH_4 , and N_2O emissions, albeit with some limitations in accuracy. Finally, the total greenhouse gas emission estimates in the Zalapa sector represented 1.78% for CO_2 , 0.43% for CH_4 , and 0.5% for N_2O of the national averages reported by FAO.

Keywords: Greenhouse gases, photochemical sensors, closed chambers, soil gas fluxes.

3. Introducción.

El cambio climático es un problema apremiante que ha ganado la atención mundial en las últimas décadas. Se refiere a un cambio a largo plazo de la temperatura promedio y otros patrones climáticos en nuestro planeta, causada principalmente por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y otras prácticas que liberan gases de efecto invernadero a la atmósfera (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2023). Estas emisiones atrapan el calor del sol y calientan la tierra, lo que provoca un aumento de la temperatura global (Hansen, 2004). Esto puede tener consecuencias de largo alcance para la salud humana, la agricultura, los ecosistemas naturales y la economía (Prasad et al., 2015).

El principal impulsor del cambio climático es el aumento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), que juegan un papel crucial en la regulación de la temperatura de la tierra al atrapar el calor y contribuir al calentamiento global. Una de las causas es el aumento de la población en las zonas urbanas lo cual significa una mayor dependencia del campo para la producción de alimentos por lo que desde el siglo XVIII la agricultura y la ganadería se han llevado a un nivel industrial, influyendo en la cantidad de contaminantes (GEI) generada por este sector (Steinfeld & Gerber, 2010). Las emisiones de GEI tienen como fuentes el cambio de uso del suelo que altera la composición del suelo, los procesos digestivos de los animales de granja y los nutrientes o fertilizantes utilizados en la agricultura (Fong et al., 2014).

Según la FAO (2014), los sectores ganaderos y agrícolas son considerados el tercer campo con mayor emisión de gases de efecto invernadero en el mundo, contribuyendo con el 18% del total de emisiones. Dentro de este porcentaje, el 44% corresponde al metano, el 29% al óxido nitroso y el 27% al dióxido de carbono. Los promedios según las emisiones de AFOLU entre 2010-2017 aumentaron un 2 % (Svensson et al., 2021), América Latina representa el 7% de la generación global de GEI, de los cuales el 40% proviene del sector de sector del uso de la tierra, cambio del uso de la tierra y silvicultura (Calvin et al., 2016). En Ecuador el sector agropecuario es el tercer emisor de GEI con 18,17 % sobre emisiones totales (Ecuador, 2018).

Según el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), Ecuador fue responsable de emitir 53,8 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente (MtCO_2e) en 2019. Esto representa aproximadamente el 0,14% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Masson-Delmotte et al., 2021).

Dentro del sector agrícola, las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero en Ecuador son la fermentación entérica (es decir, los procesos digestivos en el ganado), el manejo del estiércol y el cultivo de arroz. El ganado es una fuente significativa de emisiones debido a la gran cantidad de ganado en el país, lo que resulta en cantidades significativas de emisiones de metano provenientes de la fermentación entérica y el manejo del estiércol. El cultivo de arroz también es una fuente de emisiones debido al uso de métodos anaeróbicos para hacer crecer el cultivo, lo que genera emisiones de metano (Masson-Delmotte et al, 2021).

El Ecuador ha implementado varias iniciativas para abordar las emisiones de la agricultura y la ganadería, incluida la promoción de prácticas sostenibles de gestión ganadera, una mejor gestión del estiércol y el uso de métodos de cultivo de arroz más eficientes. Sin embargo, reducir las emisiones de estos sectores puede ser un desafío debido a la importancia de la agricultura y la ganadería para la economía y los medios de vida del país (Bárcena et al., 2020). Por otro lado, en la ciudad de Loja no existe un inventario exacto de la estimación de los gases de efecto invernadero a pesar de que cuenta con un registro de las personas que se dedican a la agricultura y ganadería (alrededor de 11.234 personas), donde el 75% representa a las zonas rurales y el 25% al casco urbano (INEC, 2010; GADM Loja, 2014). Sin embargo, esto trae consigo impactos negativos al ambiente en especial a la atmósfera ya que emanan GEI y se desconoce el grado de concentración de estos debido a la falta de información y estudios realizados en nuestra ciudad.

Por lo tanto, es fundamental cuantificar con precisión estas emisiones para comprender la magnitud del problema y desarrollar estrategias efectivas para reducir las emisiones de GEI, por ello se ha adaptado varias técnicas accesibles que son económicamente viables para los usuarios, ya que muchas de estas requieren altos costos, tiempo y experiencia (Medina-Rosas, 2014). Una de las técnicas para medir las concentraciones de GEI es mediante el uso de cámaras estáticas, su uso en un amplio rango de usos de suelo y latitudes la ha hecho popular, su empleo en medición de flujos de GEI en zonas agrícolas data de hace más de 30 años y representa un 95% de las investigaciones para medición de gases (FAO, 2015), esta técnica consiste en medir la cantidad total de gases como CO₂, CH₄ y N₂O que se emiten desde el suelo en un determinado periodo de tiempo (Arenas, 2016). Sin embargo, el muestreo está determinado por condiciones ambientales que pueden presentar un sesgo en la cuantificación de los datos. Las cámaras estáticas pueden presentar diferentes diseños que van desde formas cilíndricas a rectangulares, construidas con materiales de PVC o acero inoxidable, con tapas herméticas cerradas envueltas en papel aislante del calor (Acuña-Vilchez, 2017); por lo general, se usan métodos de

cromatografía de gases para determinar las concentraciones de GEI, y otras están equipadas con sensores especializados que detectan con precisión la presencia de GEI, incluidos el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), sin embargo los análisis resultan altamente costosos para llevarlos a cabo durante un adecuado periodo de tiempo. El presente trabajo buscó una alternativa de bajo costo mediante el empleo de sensores electroquímicos como el MQ₄ para medir CH₄ y MQ135 para N₂O, mientras que para CO₂ se usó un sensor de infrarrojo MHZ-19B, que permitió obtener información valiosa sobre las tasas de emisión en suelos cultivados y en suelos de pastoreo. Esta información permitió identificar las fuentes de emisiones de GEI y determinar qué fuentes contribuyen más al problema. Además, el uso de cámaras estáticas proporciona información valiosa sobre la distribución espacial de las emisiones de GEI, lo cual es crucial para desarrollar estrategias específicas y efectivas para reducir las emisiones de GEI. La metodología empleada en el presente estudio permitirá reducir costos en redes de monitoreo continuo, brindando así información valiosa sobre la magnitud, los patrones y las fuentes de las emisiones de GEI, lo cual es crucial para comprender el problema y desarrollar soluciones efectivas en la comprensión de la magnitud del problema y seguir el progreso hacia la reducción de emisiones para la ciudad de Loja.

El presente trabajo tiene como objetivo general: Cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero en suelos agrícolas y ganaderos en el sector Zalapa al norte de la ciudad de Loja mediante cámaras estáticas cerradas y presenta los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar las condiciones de suelo y vegetación en el sector de Zalapa.
- Determinar las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O en suelos agrícolas y ganaderos mediante cámaras estáticas cerradas en el sector Zalapa, ciudad de Loja.

4. Marco teórico

4.1. Cambio climático

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [IPCC] (2013), y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [CMNUCC] (2020) definen al cambio climático a los cambios a largo plazo en los patrones climáticos globales causados por las actividades humanas, particularmente la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Estos cambios incluyen el aumento de las temperaturas, fenómenos meteorológicos más frecuentes y severos y cambios en los patrones de precipitación.

La CMNUCC (2020) además destaca la necesidad urgente de tomar medidas para limitar el calentamiento global y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para evitar los peores impactos del cambio climático.

4.2. Gases de Efecto Invernadero (GEI)

El IPCC (2020), define a los gases de efecto invernadero como aquellos que "absorben y emiten radiación infrarroja en la atmósfera, lo que resulta en un efecto de calentamiento en la Tierra". Y de acuerdo con el Ministerio del Ambiente de Ecuador en la Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, los principales gases de efecto invernadero (GEI) emitidos en Ecuador son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), en ese orden de importancia (MAE, 2017).

4.2.1. Metano CH₄

El IPCC (2021), define al metano (CH₄) como un gas de efecto invernadero que se produce naturalmente en la Tierra, así como también es emitido por actividades humanas, como la producción y transporte de combustibles fósiles, la gestión de residuos y la agricultura y es considerado el segundo gas de efecto invernadero más importante después del dióxido de carbono en términos de su contribución al calentamiento global. El metano también juega un papel importante en la química atmosférica, ya que afecta la oxidación del dióxido de nitrógeno y la formación de ozono en la troposfera. Además, el metano también es un gas precursor del dióxido de carbono, lo que significa que su liberación en la atmósfera puede contribuir al calentamiento global a largo plazo.

Según Gautam et al. (2021), el metano es un gas de efecto invernadero que se produce naturalmente en la Tierra, pero que también es emitido por actividades humanas, como la

producción y transporte de combustibles fósiles, la gestión de residuos, la agricultura y la producción de alimentos. El metano tiene una vida media de alrededor de 12 años en la atmósfera y es capaz de absorber aproximadamente 28 veces más calor que el dióxido de carbono, lo que lo convierte en un importante contribuyente al calentamiento global.

Según Sauniois et al. (2021), el ciclo del metano comienza con la producción de metano en fuentes naturales, como los humedales, los cuerpos de agua, los terrenos inundados y los sistemas de permafrost, también se produce a través de procesos biológicos en animales, como vacas y ovejas, y en la gestión de residuos y la agricultura. Una vez que se produce el metano, es liberado a la atmósfera y comienza a interactuar con otros gases, como el oxígeno y el dióxido de carbono. El metano tiene una vida media de alrededor de 12 años en la atmósfera, durante la cual puede absorber una gran cantidad de energía y contribuir al calentamiento global. Además, una parte del metano producido es consumido por bacterias metanotróficas en los suelos y los cuerpos de agua, lo que reduce su liberación a la atmósfera. En resumen, el ciclo del metano implica su producción en fuentes naturales y antropogénicas, su liberación a la atmósfera, su interacción con otros gases y su oxidación y consumo por procesos químicos y biológicos.

4.2.2. Dióxido de carbono CO₂

Rogeli et al. (2016), considera al CO₂ como un gas de efecto invernadero más importante que se libera por la actividad humana. La quema de combustibles fósiles es la principal fuente de emisiones de CO₂, y estas emisiones están aumentando rápidamente a medida que aumenta la demanda de energía en todo el mundo. El CO₂ se acumula en la atmósfera y tiene un efecto acumulativo, lo que significa que las emisiones pasadas y presentes están contribuyendo al cambio climático actual y futuro.

Haines (2020), afirma que el CO₂ es el principal gas de efecto invernadero responsable del cambio climático. Su concentración en la atmósfera ha aumentado en un 47 % desde la era preindustrial, y la quema de combustibles fósiles es la principal fuente de emisiones antropogénicas de CO₂.

Es necesario hacer énfasis en el ciclo del carbono (C) donde el CO₂ es el más influyente porque es un proceso natural que tiene una gran influencia en el clima y la vida en la Tierra. El ciclo del carbono es un ciclo biogeoquímico en el que el carbono se mueve entre la atmósfera, los océanos, la tierra y los seres vivos. La quema de combustibles fósiles ha alterado significativamente el ciclo del carbono, ya que ha aumentado la cantidad de CO₂ en la atmósfera

y ha cambiado la forma en que el carbono se mueve entre las diferentes reservas" (Shukla, 2019).

Cuando el carbono es liberado a la atmósfera a través de procesos de difusión, una parte de él es capturado por la fotosíntesis y almacenado en el suelo como materia orgánica. Esta materia orgánica sirve como sustrato para los microorganismos, quienes oxidan el carbono del suelo convirtiéndolo en CO₂ (Orjuela, 2018). Es esencial tener en cuenta que los procesos erosivos y oxidativos asociados a las prácticas y cultivos agrícolas pueden alterar el equilibrio a largo plazo del carbono y nitrógeno orgánico en el suelo, convirtiéndose así en la principal fuente de emisiones de CO₂ en la atmósfera. Estas actividades, conocidas como AFOLU (Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra), representan aproximadamente el 13 % de las emisiones totales de CO₂ (IPCC, 2016).

4.2.3. Óxido nitroso N₂O

Stirling et al. (2017), define al óxido nitroso como un gas de efecto invernadero cada vez más importante, responsable de aproximadamente el 6 % del forzamiento radiactivo antropogénico. Los autores también señalan que el óxido nitroso es un gas de efecto invernadero mucho más potente que el dióxido de carbono, y que su impacto en el cambio climático es a menudo subestimado, destaca que las principales fuentes de emisiones de óxido nitroso son la agricultura, la gestión de residuos y la quema de combustibles fósiles, y discute las medidas que se pueden tomar para reducir estas emisiones, como la mejora de la eficiencia de los fertilizantes y la gestión de residuos, así como la transición hacia fuentes de energía renovable.

Un estudio reciente publicado en 2020 titulado "*Global and regional trends in greenhouse gas emissions from livestock*" estima que la ganadería es responsable de emitir aproximadamente 4,1 millones de toneladas de óxido nitroso a la atmósfera en todo el mundo en 2017 (Herrero et al., 2020). Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas emisiones pueden variar según la región y el tipo de ganado.

El ciclo del óxido nitroso, también conocido como ciclo microbiano del óxido nitroso, es un proceso biogeoquímico que involucra la producción y consumo de óxido nitroso en el suelo y la atmósfera. Un estudio relevante realizado por Wrage et al. (2001), describen cómo las bacterias nitrificantes convierten el amonio en nitrato y liberan óxido nitroso como subproducto. Luego, las bacterias desnitrificantes convierten el nitrato en gas nitrógeno y también pueden producir óxido nitroso como subproducto. El estudio concluye que la

desnitrificación por nitrificantes es una fuente importante de emisiones de óxido nitroso en el suelo.

4.3. Emisiones de GEI en actividades agrícolas y ganaderas

Las actividades agrícolas y ganaderas son importantes fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Según un informe reciente de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la agricultura y la ganadería son responsables de aproximadamente el 10 % de las emisiones globales de GEI. Además, destaca que las principales fuentes de emisiones de GEI de la agricultura incluyen la fermentación de estiércol, el uso de fertilizantes nitrogenados y el cultivo de arroz. En el caso de la ganadería, las principales fuentes de emisiones son la producción de estiércol, la fermentación entérica y la gestión del estiércol. El informe también discute posibles estrategias de mitigación, como la mejora de la eficiencia de los cultivos y la gestión adecuada del estiércol. (FAO, 2019).

Según un informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) de 2013, se estima que la fermentación entérica es responsable de aproximadamente el 40% de las emisiones de óxido nitroso (N_2O) de la ganadería, mientras que el manejo de estiércol es responsable de alrededor del 30% de las emisiones de N_2O y CH_4 (Gerber et al., 2013).

4.3.1. Relación entre las características de la vegetación y las emisiones de GEI.

La variación en el uso del suelo se refiere a los cambios que ocurren en un área específica en términos de cómo se la utiliza. A lo largo del tiempo, una misma región puede experimentar diversos tipos de uso del suelo, lo que representa un aspecto clave para su estudio y análisis. Estos cambios en el uso del suelo son de gran relevancia en las estimaciones de GEI, porque permitirían conocer la evolución de estimaciones pasadas y futuras de estos gases (Ramankutty et al., 2006). La cobertura vegetal abarca la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, incluyendo una variedad de biomasas con distintas características ambientales, desde pastizales hasta bosques naturales, también se engloban las áreas de cultivos generadas por la actividad humana; la cobertura vegetal representa los atributos biofísicos de la tierra, mientras que los usos del suelo corresponden a las actividades humanas que aprovechan dichos atributos, determinando el funcionamiento de los ecosistemas terrestres. Estos cambios en la cobertura vegetal tienen un impacto directo en la biodiversidad, y en los ciclos biogeoquímicos donde

participan activamente los GEI [Millenium Ecosystem Assesment (MEA), 2005; Foley et al., 2005].

4.3.2. Relación entre las características del suelo y las emisiones de GEI.

La materia orgánica del suelo (MOS) desempeña un papel fundamental en los atributos químicos, físicos y biológicos del suelo (Smith et al., 2015). La MOS representa una mezcla diversa de compuestos de carbono (C) en diferentes etapas de descomposición, una parte significativa de la MOS está compuesta por compuestos de C recalcitrantes, productos de procesos de resíntesis, que se asocian a la fracción de partículas pequeñas del suelo (Zinn et al., 2005). Estos compuestos de C permanecen prácticamente inalterados en el suelo durante largos períodos y muestran una respuesta lenta ante cambios en el uso de la tierra, prácticas de manejo y factores ambientales (Rumpel et al., 2011). En contraste, una proporción relativamente menor de la MOS corresponde a la fracción activa de C, que incluye la biomasa microbiana del suelo (viva) y el C lábil (no viva). Esta fracción presenta un tiempo de residencia corto y responde rápidamente a cambios en cambios de uso de suelo, prácticas de manejo y factores ambientales (Silva et al., 2010). La fracción activa tiene un papel crucial en la acumulación o pérdida a corto plazo de MOS, ya que es la principal fuente de energía para la actividad microbiana (Bongiorno et al., 2019). La MOS es un componente vital para el funcionamiento y la fertilidad del suelo, y su composición y respuesta a los cambios en el entorno son de gran importancia para comprender los ciclos biogeoquímicos y el impacto de las actividades humanas en los ecosistemas terrestres.

Por otra parte, existe una relación directa entre las propiedades físicas del suelo y las emisiones de gases de efecto invernadero; los efectos de la textura del suelo, la porosidad y el contenido de agua son en conjunto variables que influyen directamente en los flujos de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono de los suelos. Los suelos con alta porosidad y baja densidad aparente tienen más probabilidades de emitir gases de efecto invernadero, mientras que los suelos con baja porosidad y alta densidad aparente tienen más probabilidades de secuestrar carbono (Della et al., 2021). Los flujos de CH₄ se correlacionan con el contenido volumétrico de agua del suelo al igual que los flujos de N₂O, y los flujos de CO₂ se correlacionan a más del contenido volumétrico de agua del suelo con la temperatura del suelo. También las emisiones de CH₄ y CO₂ se correlacionan con el contenido de materia orgánica del suelo y carbono total, las emisiones de CO₂ se correlacionan con la biomasa de las plantas y las emisiones de N₂O se correlacionarán con el contenido total de nitrógeno (Della et al., 2021).

4.4. Extrapolación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Las estimaciones de gases de efecto invernadero son un proceso crucial para comprender y abordar el impacto ambiental de las actividades humanas. Para llevar a cabo estas estimaciones, se pueden utilizar diferentes enfoques, uno de los cuales implica realizar mediciones directas de emisiones en cámaras cerradas estáticas. Estas mediciones proporcionan datos precisos y confiables sobre las emisiones en un área específica. Una vez que se obtienen los resultados de las mediciones en las cámaras cerradas, se puede proceder a extrapolar estos datos para calcular las emisiones totales en función del tamaño y extensión calculada en la zona de estudio. Esta extrapolación es fundamental para obtener una visión más amplia y representativa de las emisiones en toda la localidad en estudio. Al considerar tanto las mediciones directas como la extrapolación, es posible obtener estimaciones más completas y realistas de las emisiones de gases de efecto invernadero en el área analizada. Estos datos resultantes son esenciales para informar políticas y medidas de mitigación que aborden eficazmente el cambio climático y promuevan un desarrollo sostenible. Además, estas estimaciones proporcionan una base sólida para el seguimiento y la evaluación del progreso en la reducción de emisiones a lo largo del tiempo. Por lo tanto, la combinación de mediciones y extrapolación es una herramienta valiosa en el estudio de gases de efecto invernadero y en la búsqueda de soluciones efectivas para enfrentar los desafíos climáticos actuales (Guerrero, et al., 2008).

4.5. Técnicas de cuantificación de gases de efecto invernadero en suelo

Existen diferentes técnicas de cuantificación de gases de efecto invernadero (GEI) en el suelo. Algunas de ellas incluyen:

1. Muestreo y análisis de gases: Esta técnica implica tomar muestras de suelo en diferentes ubicaciones y profundidades, y analizar los gases emitidos por el suelo, como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Se utilizan equipos especializados para medir la concentración de estos gases (Corrales Ulate, 2018).

2. Cámaras de flujo cerradas: Este método implica colocar cámaras herméticas sobre el suelo y medir la acumulación de gases en el interior de la cámara a lo largo del tiempo. Estas cámaras evitan el intercambio de gases con la atmósfera circundante y permiten medir las emisiones directamente (Arenas, 2016).

3. Sensores y medidores automáticos: Se utilizan sensores y medidores automáticos para monitorear continuamente las concentraciones de gases en el suelo. Estos dispositivos pueden

proporcionar mediciones en tiempo real y a largo plazo, lo que permite un seguimiento más preciso de las emisiones de GEI (Palacios et al., 2015).

4. Técnicas isotópicas: Esta técnica se basa en el análisis de los isótopos de los gases de efecto invernadero, lo que permite distinguir las fuentes de emisión y determinar su origen. Por ejemplo, los isótopos del carbono pueden utilizarse para distinguir entre las emisiones provenientes de fuentes bióticas y abióticas (Rozanski & Fowler, 1989).

5. Modelado y estimación: En algunos casos, se utilizan modelos matemáticos y estimaciones basadas en datos y parámetros conocidos para cuantificar las emisiones de GEI en el suelo. Estos modelos utilizan información sobre las prácticas agrícolas, características del suelo y otros factores relevantes para estimar las emisiones de GEI (IPCC, 2006).

Es importante tener en cuenta que cada técnica tiene sus propias ventajas y limitaciones, y la elección de la técnica depende de los objetivos del estudio, los recursos disponibles y las condiciones específicas del sitio. Además, es común combinar varias técnicas para obtener una evaluación más completa de las emisiones de GEI en el suelo.

4.5.1. Cámaras estáticas

Las cámaras estáticas cerradas son dispositivos utilizados para medir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en suelos. Estas cámaras consisten en estructuras herméticas colocadas directamente sobre el suelo, creando un espacio cerrado y limitado en el que se pueden medir las concentraciones de GEI.

El objetivo principal de las cámaras estáticas cerradas es capturar y acumular los gases emitidos por el suelo, como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Al cerrar herméticamente la cámara, se evita que los gases se mezclen con la atmósfera circundante, lo que permite medir y cuantificar las emisiones de manera más precisa. El proceso de medición con cámaras estáticas cerradas implica colocar la cámara sobre el suelo durante un período de tiempo determinado, generalmente de minutos a horas. Durante este tiempo, los gases emitidos por el suelo se acumulan dentro de la cámara. Posteriormente, se toman muestras de aire del interior de la cámara para analizar las concentraciones de los GEI (Arenas, 2016).

Las mediciones se realizan utilizando equipos especializados, como analizadores de gases, que pueden medir con precisión las concentraciones de los GEI en las muestras de aire recolectadas. Estas mediciones proporcionan información sobre la cantidad de GEI liberados

por el suelo y ayudan a comprender el impacto de las actividades agrícolas u otras prácticas en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las cámaras estáticas cerradas son una herramienta comúnmente utilizada en estudios de investigación agrícola y ambiental para cuantificar las emisiones de GEI en el suelo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que existen otros métodos y técnicas disponibles para medir las emisiones de GEI, y la elección de la técnica dependerá de los objetivos del estudio y las condiciones específicas del sitio (Tubiello, 2015).

Una técnica comúnmente utilizada para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero en el suelo es la medición de gases mediante cámaras estática, esta técnica de cámaras estáticas mide la cantidad total de gases producidos por los animales en un determinado periodo de tiempo, analiza la concentración de gases como CH₄, CO₂ y N₂O gracias a un flujo de aire que circula en la cámara lo que permite regular las condiciones de temperatura y humedad (Arenas, 2016).

Du et al. (2021) señalan que la técnica de cámaras estáticas se ha utilizado ampliamente en la investigación de gases de efecto invernadero en el suelo debido a su simplicidad, bajo costo y facilidad de uso, aunque reconocen que esta técnica puede tener algunas limitaciones en la precisión de las mediciones.

4.5.1.1. Diseño de cámaras estáticas cerradas

Existen diferentes tipos de cámaras estáticas que se utilizan para medir las emisiones de gases de efecto invernadero en el suelo. A continuación se presentan algunos diseños:

Cámara estática cerrada: Esta es la forma más simple de cámara estática, que consiste en una cámara hermética colocada sobre una sección del suelo. Esta técnica se utiliza para medir las emisiones de gases de efecto invernadero en el suelo, incluyendo el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso. (IPCC, 2006).

Cámara estática abierta: Esta técnica implica colocar una cámara abierta sobre una sección del suelo, permitiendo la circulación del aire. La concentración de gases dentro de la cámara se mide en intervalos de tiempo regulares, lo que permite estimar la tasa de emisión de gases de efecto invernadero en el suelo. (Butterbach-Bahl et al., 2013)

Cámara estática de flujo: Esta técnica implica el uso de una cámara hermética con un flujo de aire constante que entra y sale de la cámara. La concentración de gases dentro de la cámara

se mide a intervalos regulares para estimar la tasa de emisión de gases de efecto invernadero en el suelo. (Li, et al., 2019).

Cámara de gradiente: Esta técnica implica el uso de una cámara con una estructura de gradiente de concentración, lo que permite medir las emisiones de gases de efecto invernadero en diferentes profundidades del suelo (Subke et al., 2011).

4.6. Condiciones que afectan las mediciones de GEI en suelos con cámaras cerradas

La precisión de las mediciones de gases de efecto invernadero (GEI) en cámaras cerradas puede verse afectada por varias variables ambientales, tales como la temperatura, la humedad, la presión y la composición del aire. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta estas variables al momento de realizar la toma de muestras en cámaras cerradas, ya que cualquier variación en estas condiciones puede influir significativamente en los resultados de la medición de GEI (Bekku et al., 1995; Butterbach-Bahl et al., 2016)

Temperatura: Las mediciones de GEI en suelos pueden verse afectadas por la temperatura, ya que ésta influye en la actividad biológica del suelo y, por tanto, en los procesos de emisión de gases. Por ello, es importante controlar y mantener estable la temperatura durante la toma de muestras en cámaras cerradas, a fin de evitar errores en las mediciones.

Presión: La entrada de viento a la cámara puede generar un efecto de expansión o contracción que altera el gradiente de difusión del gas dentro de la cámara, lo que puede causar errores en las mediciones de GEI. Por lo tanto, es importante tomar medidas para evitar la entrada de viento y ubicar cuidadosamente los instrumentos al momento de la instalación (Alonso et al., 2018).

Perturbaciones del suelo: La colocación de las bases de las cámaras en el suelo puede afectar la medición de gases debido a la perturbación del suelo que se produce en el proceso. Para minimizar estos errores, se recomienda que la profundidad de la base de la cámara sea suficiente para limitar la difusión lateral de los gases en el suelo. Según Lal et al. (2004), la profundidad óptima de la base de la cámara varía según el tipo de suelo, pero generalmente se recomienda que sea entre 7,5 y 10 cm para suelos de textura fina o media y entre 10 y 12,5 cm para suelos de textura gruesa. Por otro lado, según Van der Molen et al. (2011), la profundidad de la base de la cámara también puede influir en la medición del flujo de CO₂, ya que una mayor

profundidad puede reducir el flujo y viceversa. Por lo tanto, es importante elegir la profundidad adecuada en función del tipo de suelo y del objetivo de la medición.

Variaciones Espacio-Temporales: Los procesos que afectan la emisión de gases de efecto invernadero en el suelo son complejos y están influenciados por diferentes factores ambientales. Por lo tanto, la selección adecuada de tiempo y lugar para tomar muestras es crucial para obtener mediciones precisas. Según Jia et al. (2016), las emisiones de GEI pueden variar significativamente entre diferentes momentos del día y en diferentes condiciones climáticas. Además, la colocación adecuada de las cámaras también es importante para minimizar los errores en las mediciones. Según Zhu et al. (2013), la ubicación de las cámaras debe ser seleccionada cuidadosamente para representar de manera precisa la variabilidad espacial y temporal de las emisiones de gases de efecto invernadero en el área de estudio. Por lo tanto, se recomienda que se utilice un diseño de muestreo cuidadoso y la colocación de múltiples cámaras en diferentes puntos de la parcela de estudio para mejorar la precisión de las mediciones (Jia et al., 2016; Zhu et al., 2013).

4.7. Sensores para la medición de gases de efecto invernadero en cámaras estáticas cerradas.

Los sensores para la medición de GEI en cámaras estáticas cerradas son herramientas valiosas para el estudio de las emisiones de GEI en diferentes ecosistemas. Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones y desafíos asociados con su uso y mantener una cuidadosa calibración y selección de los sensores para garantizar la precisión de las mediciones.

Según Hörtnagl et al. (2018), los sensores más utilizados para la medición de GEI en cámaras estáticas cerradas son los sensores electroquímicos y su resistencia varía cuando se exponen a ciertos gases, en su interior poseen un calentador que se encarga de aumentar la temperatura interna y con esto haya una reacción con los gases provocando un cambio en el valor de la resistencia.

Existen varios sensores para la medición de GEI mismos que están determinados para el funcionamiento de un gas en específico, a continuación, se hará mención al uso de estos según los gases propuestos en esta investigación:

4.7.1. Sensor MQ-135

El sensor MQ-135 es un dispositivo de detección de gas que se utiliza para medir la concentración de varios gases, incluyendo dióxido de carbono y óxido nitroso. Según Abbas et al. (2020), el sensor MQ-135 es uno de los más utilizados y aplicables debido a su amplio rango de detección y circuito simple de alta sensibilidad y rápida respuesta. El sensor es estable y de larga duración, lo que permite tomar muestras en intervalos de una hora (Gonzalo, 2020). Además, el sensor MQ-135 es muy eficiente para el análisis continuo de CO₂ y N₂O mediante la instalación de sistemas permanentes (4 pines), lo que lo hace ideal para el monitoreo de gases en diversos entornos.

4.7.2. Sensor MQ-4

El sensor MQ-4 es un sensor de gas de alta sensibilidad que se utiliza para detectar gas metano y gas natural en el aire. El sensor MQ-4 es capaz de detectar concentraciones de metano en el aire desde 200 a 10000 ppm y se puede utilizar en una variedad de entornos para monitorear la concentración de gas metano en el aire (Jafary et al., 2021). Además, tiene una detección de larga duración lo que permite la toma de muestras en periodos de 1 a 4 horas, tiene largo periodo de vida y uso específico para el análisis de metano (Correa & Zavala, 2019).

4.7.3. Sensor MH-Z19B

Según CEPREVEN (2018), el MH-Z19B, es un módulo (sensor) de gas infrarrojo que permite detectar (CO₂) en el aire, y es utilizado para el monitoreo de la calidad del aire en interiores y exteriores. El sensor es adecuado para la medición de gases de efecto invernadero como el CO₂, y puede proporcionar una salida de datos analógica y digital para su integración en sistemas de monitoreo y control. El sensor comercial de la serie MH-Z19B es de tamaño pequeño y utiliza el principio de infrarrojos no dispersivos (NDIR). Está compuesto por una pequeña cámara en la parte interna donde el gas es sometido a luz infrarroja, el CO₂ absorbe determinada longitud de onda en el haz de luz IR de acuerdo a la concentración del gas, el sensor mide la diferencia dentro de esta longitud de onda, entregando la concentración de CO₂ en partes por millón (ppm) (Latha et al., 2016).

4.8. Impacto del efecto antrópico en las tasas de emisión

El efecto antrópico se refiere a la influencia de la actividad humana en los sistemas naturales, incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera. Esta

actividad ha aumentado significativamente las tasas de emisión de GEI y ha contribuido al cambio climático.

El impacto del efecto antrópico en las tasas de emisión de gases de efecto invernadero es un tema ampliamente estudiado en la literatura científica. El efecto antrópico se refiere a la actividad humana y su influencia en el medio ambiente, incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero.

Un estudio publicado en la revista *Nature Climate Change* en 2017 analizó el impacto de la actividad humana en la tasa de emisión de CO₂. Los autores encontraron que las emisiones de CO₂ atribuibles a la actividad humana han aumentado a una tasa media anual del 3,4% entre 2000 y 2016, lo que representa un aumento del 60% en las emisiones anuales de CO₂ en el mismo período (Le Quéré et al., 2017).

Según un estudio realizado por Cattaneo et al. (2020), el uso de fertilizantes nitrogenados en la agricultura contribuye significativamente a las emisiones de óxido nitroso, un gas de efecto invernadero potente. Además, la quema de residuos agrícolas y la tala y desmonte de bosques para la expansión de la agricultura también son importantes fuentes antropogénicas de emisiones de dióxido de carbono.

La quema de residuos agrícolas, como los restos de cultivos y la paja, para preparar la tierra para futuros cultivos, puede contribuir significativamente a la emisión de gases de efecto invernadero. En la India, se estima que la quema de residuos agrícolas es responsable del 17% de las emisiones de gases de efecto invernadero del país (Iyengar et al., 2020).

5. Metodología

El presente estudio es una investigación descriptiva no experimental de tipo transversal, con alcance descriptivo, donde las variables se las midieron en un único tiempo y no serán manipuladas, esto significa que no habrá una intervención en el entorno de los participantes y que las mediciones se llevarán a cabo en un solo momento en el tiempo (Hui et al., 2018).

5.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el sector de Zalapa, ubicado en el área periférica norte de la ciudad de Loja (Figura 1), ubicada en el cantón y provincia de Loja en el Sur de la Región Interandina del Estado ecuatoriano en las coordenadas -3.9327 Latitud Sur y -79.2342 de Longitud Oeste. (GADM Loja, 2017); en la urbe, la altitud varía entre 2.400 m a 2000 m.s.n.m, siendo la más baja en el Norte, respecto a los bordes, varía entre 2.550-2.200 m al oeste y 2.400-2.200 m al este (GADM Loja, 2014).

Las condiciones climáticas muestran temperaturas alrededor de los $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, una precipitación anual de 900 mm (PNUMA, 2009). Durante los meses de marzo y abril se presentan los mayores niveles de precipitación, mientras que en octubre se registra una disminución en la cantidad de lluvia (PNUMA, 2009).

Según Jiménez Borja (2019), en la ciudad de Loja se puede clasificar el uso del suelo en ocho categorías distintas, siendo las más predominantes los pastizales y bosques naturales. No obstante, la zona nor-occidental presenta un mayor grado de impacto humano, ya que se caracteriza por la existencia de pastizales, cultivos, plantaciones forestales y matorrales en etapas tempranas de crecimiento.

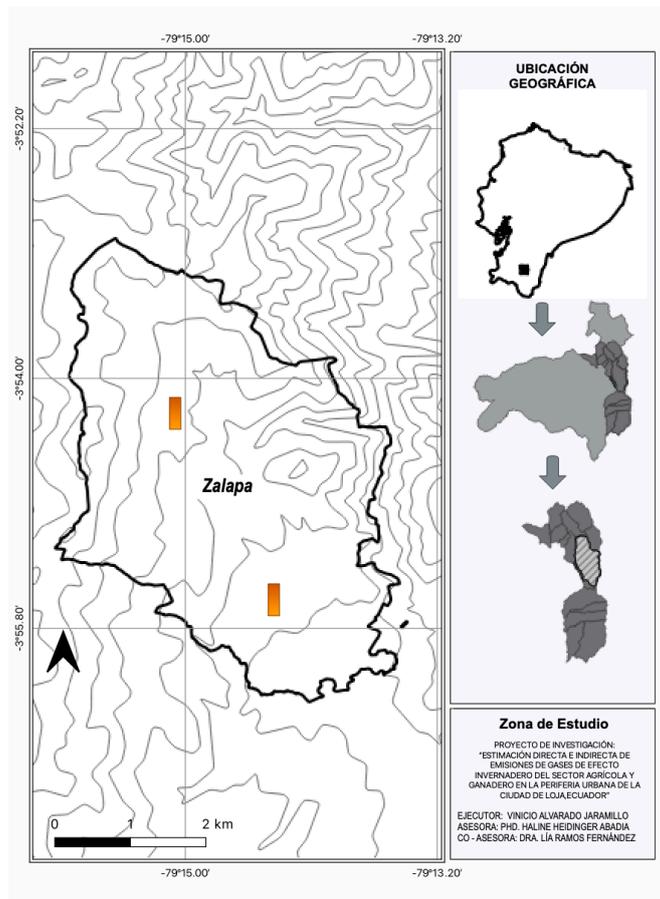


Figura 1. Mapa de la periferia norte de la ciudad de Loja

5.2. Metodología para el primer objetivo: Evaluar las condiciones de suelo y vegetación en el sector Zalapa.

En la fase inicial del estudio, el objetivo primordial consistió en caracterizar minuciosamente el área de investigación en base a las condiciones del suelo y la vegetación, con el propósito de proporcionar una base necesaria para realizar una estimación general de las emisiones de gases de efecto invernadero en la zona de estudio, considerando tanto las actividades agrícolas como ganaderas. Para alcanzar este objetivo, se siguió la siguiente metodología:

5.2.1. Caracterización de la vegetación.

Para realizar la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero, es necesario contar con información sobre el uso del suelo. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2006) establece que, para estudios de nivel 1, se consideran seis categorías de uso del suelo: tierras forestales, tierras de cultivo, pastizales, humedales, asentamientos y otras tierras. Sin embargo, el IPCC permite la posibilidad de utilizar una categorización diferente según cada

país (IPCC, 2006a). En este estudio, se optó por utilizar la metodología presentada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería y Ministerio del Ambiente (MAE-MAGAP, 2015), que detalla 11 categorías a nivel de uso del suelo: bosque nativo, plantación forestal, vegetación arbustiva, páramo, vegetación herbácea, cultivo, pastizal, mosaico agropecuario, cuerpo de agua, área poblada e infraestructura. Esta categorización más detallada permitió una mejor caracterización de las áreas de estudio y una mayor precisión en la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

5.2.1.1. Selección de los sitios representativos

Se seleccionaron dos sitios representativos en la zona de estudio, en la parte baja y la parte alta como se muestra en la Figura 1. Estos sitios se seleccionaron por ser representativos en cuanto a las prácticas agrícolas y ganaderas predominantes y con características similares de suelo, vegetación y manejo.

5.3. Evaluación de condiciones de suelo y vegetación

Se realizó un muestreo al azar del suelo en la zona de estudio, considerando diferentes áreas representativas de las prácticas agrícolas y ganaderas, se realizaron análisis sobre propiedades físicas del suelo, como textura, estructura, densidad real y aparente. Estos datos permitieron evaluar las condiciones del suelo y establecer posibles relaciones con las prácticas agrícolas y ganaderas.

5.3.1. Características físicas y químicas del suelo

Los análisis físicos y químicos se realizaron en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Loja, las muestras se tomaron en base instructivo INT/SFA/10 de Agrocalidad y Guía de Análisis de Suelos de CORPOICA (Cuesta y Villaneda, 2005; AGROCALIDAD, 2018). En la Tabla 1 se muestran los diferentes análisis físicos y químicos realizados en suelos agrícolas y ganaderos en la zona de estudio.

Tabla 1. Análisis fisico-químicos de suelos considerados en la medición GEI.

Nombre del Análisis	Suelo Cultivado (parcela agrícola)	Suelo Pastizal (parcela ganadera)
Caracterización	Textura	Textura
	Densidad real (Dr)	Densidad real (Dr)
	Densidad aparente (Da)	Densidad aparente (Da)
	Porosidad	Porosidad
	Materia Orgánica	Materia Orgánica

5.3.2. Cobertura vegetal y distribución de áreas agrícolas y ganaderas.

Durante el reconocimiento de campo, se realizó observación directa para evaluar el tipo de pastizal, el uso de fertilizantes en el suelo y la presencia de ganado vacuno. Se utilizó una encuesta simple de tipo descriptivo y marcación simple para recopilar esta información, la cual se encuentra detallada en el Anexo 1. Una vez obtenido el mapa de cobertura vegetal mediante una clasificación supervisada de imágenes satelitales, se logró una clara visualización y delimitación de las áreas destinadas a actividades agrícolas, específicamente zonas de cultivo, y a pastizales utilizados para la ganadería en el sector de estudio. Esta información resulta fundamental, ya que servirá como insumo clave para realizar una estimación precisa de las emisiones de gases de efecto invernadero en la región analizada.

La identificación de las áreas agrícolas y de pastizales a partir de las imágenes satelitales permite una caracterización detallada de los diferentes tipos de uso del suelo en el área de interés. Al conocer con precisión la distribución de estas actividades, se pudo calcular de manera más precisa la cantidad de emisiones asociadas a cada tipo de terreno y, por ende, obtener una estimación integral de las emisiones en el sector estudiado.

5.4. Metodología para el segundo objetivo: Determinar las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O en suelos agrícolas y ganaderos mediante cámaras estáticas cerradas en el sector Zalapa, ciudad de Loja.

Para cumplir con el presente objetivo, se utilizaron cámaras estáticas cerradas cuya metodología ha sido debidamente documentada desde los años 80 (Hutchinson y Livingston, 2001; Arenas, 2016; Butterbach-Bahl et al., 2016, Leite et al., 2021), para su construcción se usaron tubos de 10” de PVC. Se adaptó un sistema de medición continuo de gases con sensores automatizados electroquímicos e infrarrojos de bajo costo (Palacios et al., 2015; Yang et al., 2019; Rajasekar et al., 2022), estos sensores permitieron estimar las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) en suelos agrícolas y ganaderos en el sector Zalapa. Es importante señalar que la técnica de medición de flujos de gases de efecto invernadero en el suelo mediante cámaras cerradas estáticas con sensores electroquímicos presentan mediciones que pueden servir para realizar estimaciones debiendo comprobar sus aproximaciones con los métodos de medición oficiales que usan cromatografía de gases.

5.4.1. Construcción de las cámaras estáticas

De acuerdo a Arenas (2016), la cámara estática cerrada convencional consiste en dos partes: la base y la cámara, que pueden fabricarse en diferentes materiales como acero inoxidable o con tubos de PVC. Las dimensiones para el diseño de la cámara fueron propuestas por el proyecto "Gestión de gases de efecto invernadero en el sector AFOLU en la periferia urbana de la ciudad de Loja", existen muchas dimensiones que son analizadas por De Klein and Harvey (2012) y Arenas (2016), sin embargo se pueden considerar las siguientes variables de diseño:

Tabla 2. Especificaciones para el diseño de cámaras estáticas cerradas.

Especificación	Medidas propuestas
Volumen de la cámara	10 L
Altura de la cámara	25,4 cm
Altura de la Base	10 cm
Diámetro interno	22,5 cm
Radio	11,25 cm
Área de la base	397,4 cm ²
Tiempo de muestra	9 horas/día
Número de cámaras	3

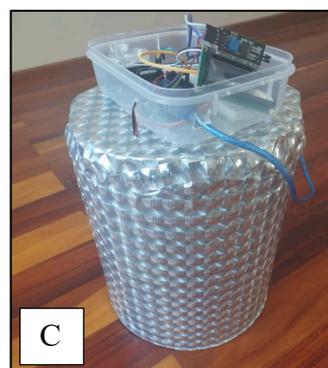
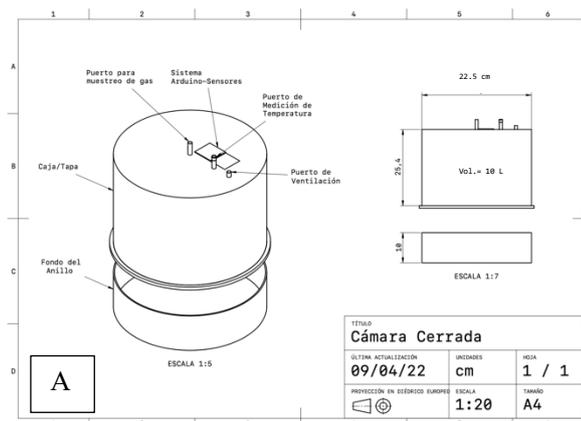


Figura 2. A) Diseño de la cámara, B) construcción de bases y tubos, C) Diseño final con los sensores instalados.

5.4.2. Ensamble y calibración de sensores.

Para el ensamble de los circuitos, se consideró el tipo de Arduino utilizado, ya que las conexiones varían según la serie. En este estudio, se empleó una placa de Arduino modelo Mega 2560 con 54 pines para conectar diversos módulos, como sensores, reloj, tarjeta de almacenamiento, humedad y pantalla de lectura. Para realizar las conexiones, se utilizó un protoboard que recibió alimentación de 5V provenientes del Arduino. Cada módulo tiene una disposición específica de pines. Por ejemplo, el RTC DS3231 utiliza 4 pines. El pin de tierra (GND) se conectó al polo negativo, el de voltaje (Vcc) se enlazó a los 5V suministrados en el protoboard, y los dos pines restantes (SCL y SDA) se conectaron a los pines análogos A5 (SCL) y A4 (SDA).

La tarjeta de almacenamiento cuenta con 6 pines (VCC, CS, MOSI, SCK, MISO, GND). Se realizaron las siguientes conexiones: el pin de tierra (GND) se conectó al polo negativo, el de voltaje (Vcc) se unió a los 5V, el CS se conectó al pin análogo 53, el MOSI al pin análogo 51, el CLK al pin análogo 52, y el MISO al pin análogo 50. Los sensores MQ-4 para medición de CH₄ y MQ-135 para medir N₂O se conectaron a la placa Arduino. Estos sensores cuentan con 4 pines: una conexión análoga, una digital, tierra y voltaje. Se emplearon 3 pines, y para Vcc y GND se siguieron los mismos procedimientos mencionados anteriormente, diferenciándose en el uso de los pines análogos A0, A1 (MQ-4) y A3 (MQ-135).

Los sensores MQ requieren un proceso de "quemado" (calentamiento) previo para permitir que sus materiales adquieran sensibilidad y asegurar mediciones confiables. Por ello, los sensores MQ-4 y MQ-135 fueron sometidos a un proceso de calentamiento durante 48 horas y luego se estabilizaron en una cámara cerrada con valores de CH₄ (1,9 ppm) y N₂O (0,33 ppm) este proceso se llevó a cabo a las 12:00 a.m., para evitar alteraciones de las concentraciones de calibración. Por otra parte, el sensor MH Z19B para mediciones de CO₂ no necesitó ser calibrado debido a que se comercializa calibrado por el fabricante (Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., 2019).



Figura 3. Pre calentamiento de sensores y ensamble de circuitos.

5.4.3. Configuración de sensores

Utilizamos el programa Arduino IDE para generar el código necesario para los sensores. Seleccionamos el puerto correspondiente (Arduino Mega 2560) se verifica el puerto de conexión y a continuación se cargan las librerías necesarias para los módulos instalados, como Adafruit, DHT, LiquidCrystal I2C y RTCLib. Siguiendo la estructura de otros programas como R o Python, implementamos un comando de lectura y se programa un intervalo de 30 minutos para la lectura del RTC. Asimismo, se configuró la tarjeta SD para almacenar los datos, incluyendo la fecha, hora, valores de los tres gases, humedad y temperatura. Finalmente, subimos el código con el programa IDE de Arduino (Ver Anexo 3).

5.5. Cuantificación de gases de efecto invernadero en suelos agrícolas y ganaderos.

5.5.1. Diseño de muestreo.

El muestreo tuvo lugar en una extensión de 4 hectáreas de pastizales dedicadas a la ganadería y en 1,5 has dedicadas al cultivo de hortalizas, estos sitios mostraron características homogéneas de suelos y también de manejo. El número de réplicas por sitio o parcela fueron tres cámaras colocadas a 2 m de distancia; considerando la variabilidad del N_2O , se realizó un desplazamiento (de las cámaras hacia diferentes potreros y sitios de cultivo con la finalidad de cubrir la mayor área de estudio; dicho desplazamiento se lo realizó con intervalos regulares de un día y un total de tres rotaciones como se ve en la Figura 4.

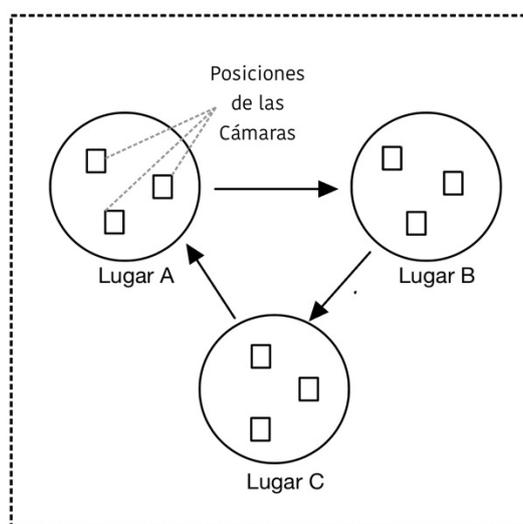


Figura 4. Disposición de unidades discretas para muestreo con desplazamiento de las cámaras cerradas estáticas.

5.5.2. Colocación de cámaras cerradas.

La base de la cámara se insertó en el suelo lo suficientemente profundo para evitar fugas de gas desde el espacio de la cabeza de la cámara enterrándola aproximadamente 5 cm (Hutchinson y Livingston 2001). Las bases se colocaron con 48 horas de anticipación evitando disturbar el suelo al momento de colocarlas, al colocar la cabeza de la cámara se procedió al sellado con la base, para tal efecto se usó una correa de caucho de 10 cm de ancho comprimidas por sujetadores en el momento de su colocación. Para evitar un calentamiento no natural en la cámara durante las mediciones de gases la cámara y tarjeta Arduino se cubrieron con materiales aislantes como la espuma Flex y láminas reflectantes Figura 5.



Figura 5. Cámaras cerradas en parcela en el sector Zalapa.

5.5.3. Operación de la cámara, accesorios y medición de emisiones.

La tarjeta Arduino 2560 colocada en la parte exterior de la cámara se conectó mediante un puerto USB a un par de baterías recargables 18650 de 3.7 V colocadas en el escudo de batería de litio ESP8266, el equipo se enciende a partir de las 8h00. A partir de ese momento los sensores registraron las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O en unidades de partes por millón (ppm) en intervalos de 30 minutos hasta las 17h00. Los datos fueron almacenados en la tarjeta SD acoplada al circuito.

5.5.4. Procesamiento y análisis final de datos

El procesamiento de datos se lo realizó en el *software Excel* del paquete *Office* y el análisis de gráficas de análisis temporal, Boxplot y estadísticos en *Python*. Se analizaron las correlaciones entre las mediciones de gases y las condiciones ambientales dentro de la cámara

se hizo el cálculo de la matriz de correlación para las variables CO₂, CH₄, N₂O, Temperatura y Humerdad Relativa. Se aplicó las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk para todas las variables en ambas parcelas ('Ganadera' y 'Agrícola') se obtuvo que las distribuciones de estas variables no son normales. Dado que los datos no siguieron una distribución normal, fue apropiado usar el coeficiente de correlación de Spearman, que es una medida no paramétrica de correlación y no asume una distribución normal de los datos.

5.5.5. Cálculo de flujos de GEI y estimaciones para el sector de Zalapa

Con los resultados obtenidos de la cobertura de suelo para las áreas de cultivo y de pastizal se estimaron las emisiones totales en toneladas métricas/ha/día y se estimaron para el total de hectáreas encontradas en el estudio. Los flujos se calcularon mediante la siguiente fórmula (Toprak, 1995; Picot et al., 2003; Yacob et al., 2006; Singh et al., 2005; Stadmark y Leonardson, 2005):

Ecuación 1.

$$F = \frac{dC}{dt} * \frac{M * Vc}{R * T * A}$$

Donde:

F = Flujo del gas en toneladas/ha/día

$\frac{dC}{dt}$ = Rango de concentración del gas durante el tiempo de muestreo

M = Peso molecular del gas

Vc = Volumen de la cámara en Litros

R = Constante de los gases

T = Temperatura dentro de la cámara en K

A = Área transversal de la cámara en m²

Para calcular los flujos de los gases utilizando la fórmula se calculó el rango de concentración del gas (dC/dt) en un período de 9 horas para cada parcela. Esto implicó calcular la diferencia entre la concentración máxima y mínima de cada gas en cada intervalo de 9 horas. Se convirtieron las unidades de volumen y área a litros y metros cuadrados, respectivamente, para que coincidan con las unidades de la constante de los gases. Finalmente se agruparon los flujos calculados por parcela para obtener los flujos promedio para cada parcela. Con dichos valores/ha se calcularon por el total de hectáreas destinadas a cultivos y a pastizales en la zona de estudio.

6. Resultados

6.1. Evaluar las condiciones de suelo, vegetación y distribución de las áreas agrícolas y ganaderas en la periferia norte de la ciudad de Loja.

6.1.1. Propiedades del suelo.

De las muestras analizadas se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3. Análisis de las propiedades físicas y químicas en parcelas agrícolas y ganaderas en el sector Zalapa.

Indicador	Suelo Agrícola	Suelo Ganadero
Estructura	Granular	Aglomerado
Textura	Franco Arenoso	Franco Arenoso
Densidad real (Dr)	2,65 g/ml	2,65 g/ml
Densidad aparente	1,01 g/cm ³	1,63 g/cm ³
Porosidad	62 %	38 %
Materia Orgánica	2,0 %	1,2 %

Los resultados muestran algunas diferencias entre los suelos agrícolas y ganaderos en términos de estructura, densidad aparente y porosidad, según Villaroel (1988) se puede interpretar la estructura del suelo como granular, propia de suelos que han sido arados y sueltos y que se dedican a la agricultura mientras que el suelo ganadero muestra una estructura irregular en aglomerados.

La densidad aparente del suelo agrícola es de 1,01 g/cm³, más baja que la del suelo ganadero es de 1,63 g/cm³, esta medida de la compactación del suelo refleja la cantidad de partículas sólidas presentes en un volumen dado, en este caso, el suelo agrícola tiene una menor densidad aparente que el suelo ganadero, éste último refleja ligeramente una mayor compactación y menor espacio poroso.

La porosidad del suelo agrícola es del 62 %, mientras que la del suelo ganadero es del 38 %, lo que indica que el suelo agrícola tiene una mejor capacidad de retención de agua y una mejor aireación. Las diferencias observadas en la estructura, densidad aparente y porosidad entre los suelos agrícolas y ganaderos están relacionadas con las prácticas de manejo del suelo y la actividad de los cultivos o pastoreo de ganado.

Con respecto al contenido de materia orgánica, el 2 % en suelo agrícola es considerada relativamente buena para mantener la fertilidad y salud del suelo en actividades agrícolas;

mientras que un contenido de 1,2 % en materia orgánica en suelos ganaderos refleja su baja fertilidad.

6.1.2. Condiciones de vegetación en el sector Zalapa.

Mediante clasificación supervisada de imágenes satelitales de la zona de Zalapa, se obtuvo la cobertura vegetal que se muestra en el mapa de la Figura 6.

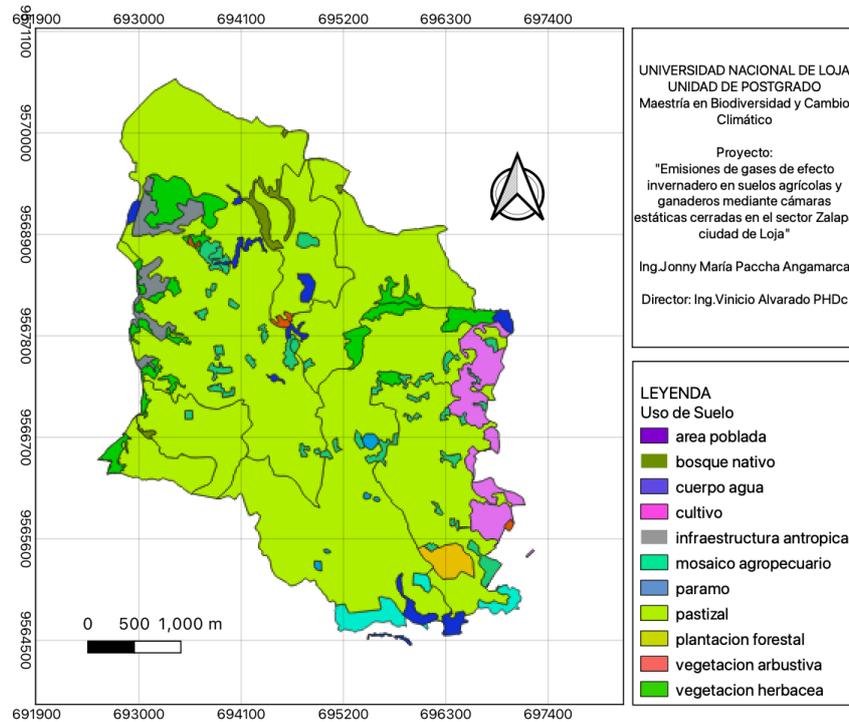


Figura 6. Cobertura vegetal en la zona de estudio

Los datos proporcionados en la Figura 6 muestran la distribución de la cobertura vegetal en hectáreas y porcentajes que se visualizan en la Tabla 4.

Tabla 4. Cobertura y uso de suelo de la zona norte de la hoya de Loja.

Área poblada	Área (ha)	Área (%)
Bosque nativo	14.27	0.84
Cuerpo agua	4.11	0.24
Cultivo	55.24	3.27
Infraestructura antrópica	25.2	1.49
Mosaico agropecuario	3.7	0.22
Páramo	33.19	1.96
Pastizal	1385.2	81.98
Plantación forestal	27.07	1.60
Vegetación arbustiva	80.68	4.77
Vegetación herbácea	61.11	3.62
Total	1689.77	100

En la Tabla 4 se muestran las áreas y porcentajes de las diferentes categorías de uso de suelo, de un total de 1689,77 has, los pastizales representan la mayor cobertura de suelo con 81,98 % (1385 has), dedicadas al pastoreo para el ganado, mientras que el 3,27 % (55,24 has) están dedicadas a cultivos. Los demás usos de suelos no se analizan en este estudio pero se dejan como referencia de las características del lugar.

6.2. Concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O.

Se presentaron las siguientes gráficas de caja y bigotes para resumir los datos obtenidos a través de la medición de flujos de gases de efecto invernadero con los sensores implementados en las cámaras cerradas. La estadística descriptiva de las variables de estudio se utilizó para evidenciar el comportamiento de los datos durante el tiempo de estudio.

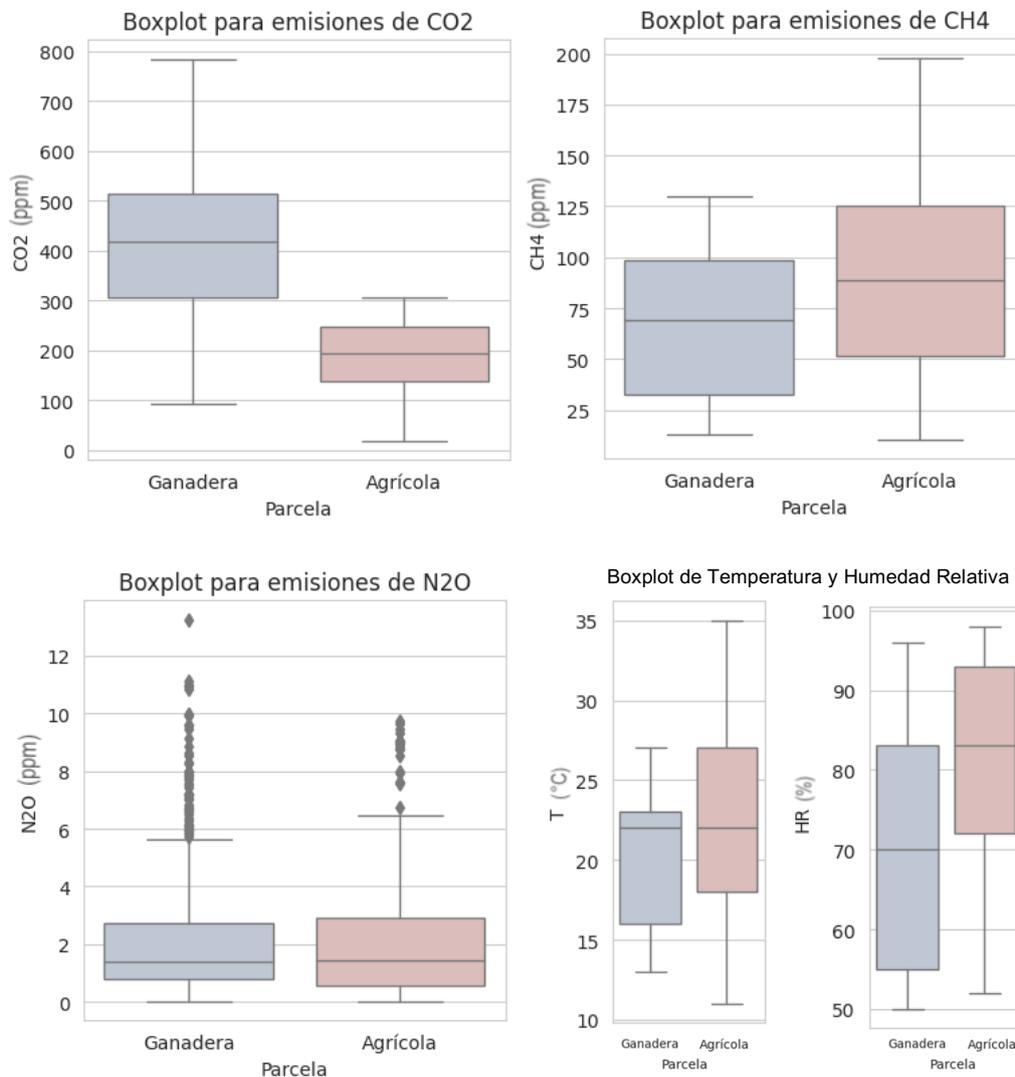


Figura 7. Comparación de las Emisiones de CO₂, CH₄, N₂O, Temperatura y Humedad Relativa en parcelas agrícola y ganadera en Zalapa.

Tabla 5. Análisis descriptivo de datos obtenidos en parcelas agrícolas en el sector de Zalapa

Estadístico	CO₂	CH₄	N₂O	T	HR
<i>Mínimo.</i>	17.74	10.52	0.02	11	52
<i>Mediana</i>	192.55	89.01	1.45	22	83
<i>Media</i>	188.69	92.45	1.96	22.36	82
<i>Máximo.</i>	305.46	197.95	9.71	35	98

Tabla 6. Análisis descriptivo de datos obtenidos en parcelas ganaderas en el sector de Zalapa

Estadístico	CO₂	CH₄	N₂O	T	HR
<i>Mínimo.</i>	90.96	13.26	0.017	13	50
<i>Mediana</i>	416.98	69.27	1.373	22	70
<i>Media</i>	405.24	67.38	2.069	20.13	70.47
<i>Máximo.</i>	784.56	129.84	13.252	27	96

En la Figura 7, se puede apreciar mayores emisiones en parcelas ganaderas que en las agrícolas; la mediana de flujo de CO₂ en suelos ganaderos llega a 416,98 ppm mientras que en las parcelas agrícolas llega a 192,55 ppm, de la misma manera las Tablas 5 y 6 muestran el promedio en las parcelas ganaderas de 405.24 ppm muy por arriba del promedio de las parcelas agrícolas 188.69 ppm. Las parcelas ganaderas presentaron valores máximos que llegaron a 784,56 ppm, frente a 305,46 ppm en parcelas agrícolas. Por otra parte se puede observar el comportamiento de las emisiones de CH₄ que fueron ligeramente superiores en suelos agrícolas que en los ganadero, las parcelas agrícolas presentan una mediana 89,01 ppm frente a 69,27 ppm en parcelas ganaderas, las Tablas 5 y 6 muestran valores máximos que llegan a 197,95 ppm en el caso de las parcelas agrícolas frente a 129,84 ppm que se registraron en parcelas ganaderas.

Así mismo, la Figura 7 muestra el comportamiento de las concentraciones de N₂O en parcelas agrícolas y ganaderas, a pesar de que la mediana es muy parecida en ambas parcelas, alrededor de 1,45 ppm para parcelas agrícolas y 137 ppm para las ganaderas, la variación de los

datos es mucho mayor en las parcelas ganaderas, se muestran una gran cantidad de datos atípicos, se registraron valores máximos que alcanzaron 13,25 ppm frente a valores máximos registrados en parcelas agrícolas de 9,71 ppm.

Finalmente, en la Figura 7 se pueden observar las variaciones de temperatura al interior de las cámaras, en el caso de las parcelas agrícolas, se registraron temperaturas mínimas de 11 °C llegando a un máximo de 35 °C, el promedio registrado fue de 22,36 °C. En el caso de las cámaras en parcelas ganaderas se registraron temperaturas mínimas de 13°C y máximas de 27°C con un promedio de 20,13 °C. De la misma manera se observan valores para humedad relativa en el interior de las cámaras ubicadas en las parcelas ganaderas, con valores mínimos del 52 % y valores que alcanzaron hasta 98 % con un promedio de 81 %, mientras que en las cámaras ubicadas en suelos ganaderos se registraron niveles mínimos de humedad relativa de 50 % y valores máximos que alcanzaron el 90 %, en promedio se registró un valor del 70,47 %.

6.2.1. Variación temporal de flujos de gases de efecto invernadero.

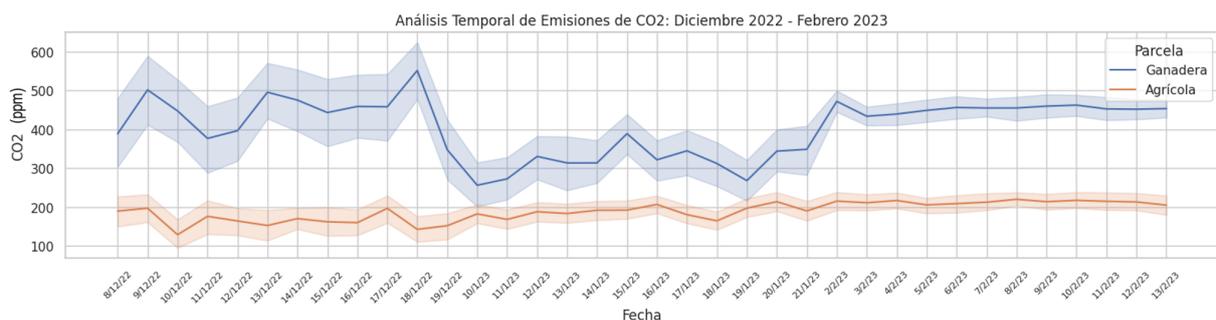


Figura 8. Flujos de CO₂ en suelos agrícolas y ganaderos de diciembre 2022 a febrero 2023

En la Figura 8 se muestra la variación de emisiones de CO₂ en suelos de uso ganadero y agrícola durante el periodo comprendido entre diciembre de 2022 y febrero de 2023. Durante el mes de diciembre, los flujos de CO₂ mostraron un comportamiento diferente en el suelo ganadero que en el cultivado, las emisiones tuvieron un comportamiento oscilatorio sin un patrón definido, del 8 al 18 de diciembre de 2022 las concentraciones oscilaron entre 400 a 550 ppm, posterior a esta fecha las concentraciones registradas empiezan a descender hasta el 10 de enero de 2023 alcanzando valores bajos de aproximadamente 250 ppm, que se elevan ligeramente en los días subsiguientes por sobre las 300 ppm, a finales del mes de enero y durante el mes de febrero de 2023 se elevan nuevamente las concentraciones alrededor de las 450 ppm. En contraste, en las parcelas agrícolas las emisiones se muestran poco fluctuantes todas por debajo de los 250 ppm.

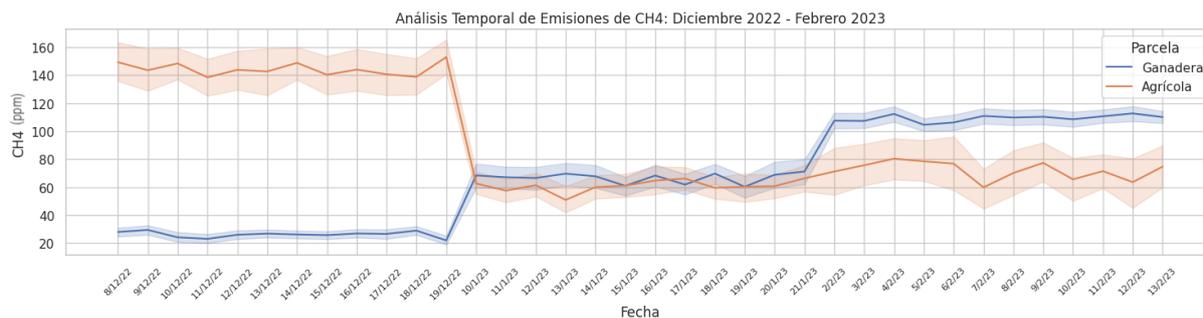


Figura 9. Flujos de CH₄ en suelos agrícolas y ganaderos durante diciembre 2022 a febrero 2023

En la Figura 9, se muestra la tendencia de los flujos de metano durante el periodo comprendido entre diciembre de 2022 y febrero de 2023. Los registros indican que entre las fechas 8 al 18 de diciembre de 2022 las concentraciones registradas fueron las más altas en los registros del estudio con valores que oscilan entre 140 y 160 ppm, posterior a dichas fechas las emisiones caen por debajo de las concentraciones de los flujos ganaderos y se mantienen durante casi todo el mes de enero con fluctuaciones que van de 50 a 70 ppm, a finales de enero de 2023 y durante todo el mes de febrero las concentraciones empiezan a incrementarse con valores que oscilan entre 60 y 100 ppm, como se puede apreciar terminan por debajo de las concentraciones registradas en parcelas agrícolas. Por otro lado, en las parcelas de uso ganadero, los valores de concentraciones registrados entre el 8 y 18 de diciembre de 2022 fueron muy inferiores a las registradas en suelos agrícolas, se aprecian pocas fluctuaciones con valores que oscilaron alrededor de las 30 ppm, a partir de estas fechas las concentraciones empiezan a ascender por encima de las concentraciones de suelos agrícolas, permaneciendo con ligeras fluctuaciones sobre las 70 ppm, es a finales del mes de enero y durante el mes de febrero que se observa un incremento de las concentraciones por sobre las 100 ppm y se mantiene alrededor de 150 ppm durante el mes de febrero de 2023.

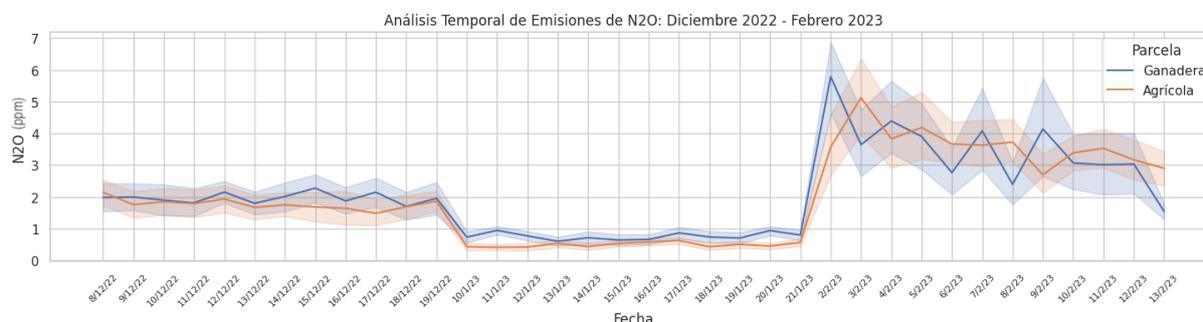


Figura 10. Flujos de N₂O en suelos agrícolas y ganaderos durante diciembre 2022 a febrero 2023

La Figura 10 muestra el comportamiento de los flujos de óxido nítrico, tanto en las parcelas ganaderas como en las agrícolas las concentraciones son poco fluctuantes entre el 8 y 18 de diciembre de 2022, si bien se puede observar que las emisiones en las parcelas ganaderas superan levemente a las emisiones de suelos agrícolas, con valores por sobre las 2 ppm mientras que en parcelas agrícolas se muestran alrededor de 1,5 ppm; luego de estas fechas las concentraciones en ambas parcelas disminuyen considerablemente y fluctúan entre 0,5 y 1 ppm, pero siempre las concentraciones en parcelas ganaderas se muestran por sobre las agrícolas, a finales del mes de enero ambas parcelas experimentan un repunte con fluctuaciones muy irregulares durante el mes de febrero, dicho repunte supera a los registros anteriores sobrepasando las 5 ppm en parcelas ganaderas descendiendo paulatinamente hasta 1,5 ppm hasta final del mes de febrero, ligeramente por sobre estos valores y con la misma tendencia se observaron las concentraciones en las parcelas agrícolas.

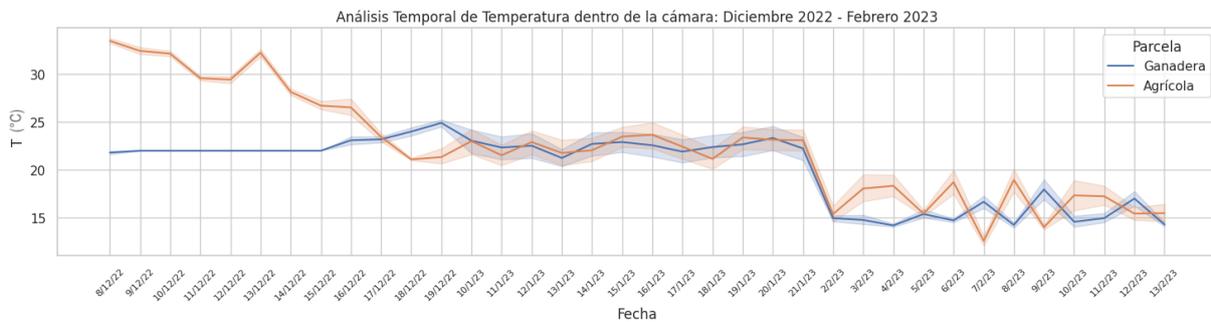


Figura 11. Variación temporal de temperatura en el interior de las cámaras cerradas

La Figura 11 muestra las variaciones temporales de temperatura registradas en el interior de las cámaras durante el periodo de estudio. Existe una marcada diferencia de temperaturas registradas en parcelas agrícolas, especialmente durante el mes de diciembre donde se registraron valores sobre los 35 °C que fueron descendiendo hasta el 18 de diciembre de 2022 en donde se registran valores próximos a los 22°C, la temperatura durante el mes de enero se mantiene con pocas oscilaciones sobre los 20 y bajo los 25°C, dichas temperaturas muestran un descenso hasta los 15°C a inicios del mes de febrero, posteriormente muestra oscilaciones entre 17 y 12°C. Por otra parte menores temperaturas se registraron en el interior de las cámaras de las parcelas ganaderas, el mes de diciembre de 2022 muestran un comportamiento constante alrededor de los 22,5 °C, se elevan ligeramente hasta los 25 °C a partir del 19 de Diciembre y se mantienen hasta finales de enero de 2023 alrededor de los 22,5 °C para caer súbitamente alrededor de los 15°C a partir del mes de febrero.

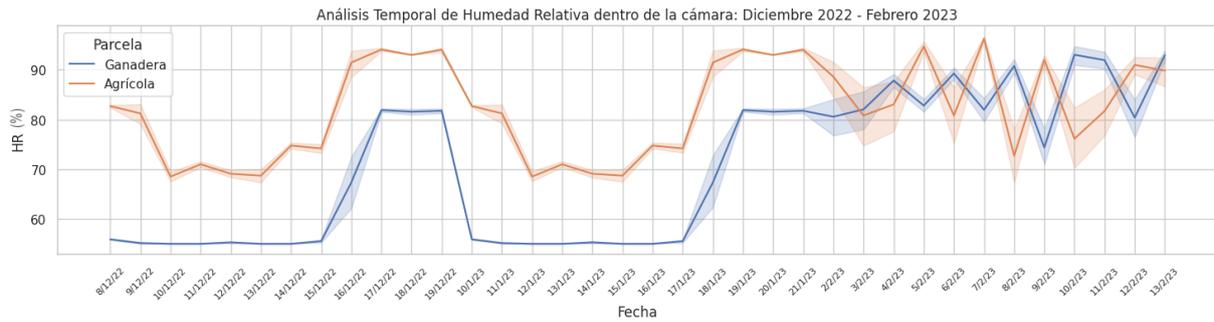


Figura 12. Variación temporal de humedad relativa en el interior de las cámaras cerradas

La Figura 12 muestra el comportamiento de la humedad relativa dentro de las cámaras, por una parte se evidencia una mayor cantidad de humedad en parcelas agrícolas, descendiendo paulatinamente de un 85 % a un 70 % en el lapso de dos días, se mantiene con ligeros incrementos en los días subsiguientes llegando alrededor del 75 %, los días 16 al 18 de diciembre de 2022 la humedad relativa (HR) alcanza alrededor del 95 %, a partir de allí empieza un descenso paulatino los primeros 11 días del mes de enero de 2023, hasta alrededor del 70 % manteniéndose alrededor de ese porcentaje hasta mediados de enero, a partir del día 17 de enero hay un repunte que alcanza nuevamente cerca del 95 %, a partir del mes de febrero hay fluctuaciones entre 75 y 95%. Por otra parte, se muestran registros de HR mucho más bajos en parcelas ganaderas, durante los primeros 15 días del mes de diciembre los porcentajes de HR se mantuvieron alrededor del 55 %, hay un repunte muy similar al de las parcelas agrícolas entre el 15 y 19 de diciembre de 2022 por sobre el 80 % para descender drásticamente en los primeros días del mes de enero manteniéndose alrededor del 55 % hasta el día 17, a partir del cual se incrementa hasta sobrepasar el 80%, luego en el mes de febrero se muestran oscilaciones que alcanzan el 90 % pero siempre por debajo de las parcelas agrícolas.

6.2.2. Análisis de correlación entre las variables

Para realizar la correlación entre las variables de estudio se procedió a realizar la prueba de Shapiro-Wilk para todas las variables en ambas parcelas 'Ganadera' y 'Agrícola'.

Tabla 7. Prueba de Shapiro-Wilk para las concentraciones de GEI por parcela

Parcela	Gas	Estadístico	<i>p</i> -valor
Ganadera	CO ₂	0,976	1,304x10 ⁻⁹
	CH ₄	0.916	5,527 x10 ⁻²⁰
	N ₂ O	0.781	1,285 x10 ⁻³⁰
Agrícola	CO ₂	0,972	6,022x10 ⁻¹¹
	CH ₄	0,962	3,753 x10 ⁻¹³
	N ₂ O	0,845	1,587 x10 ⁻²⁶

Los resultados obtenidos en la prueba de Shapiro-Wilk un *p*-valor menor a 0,05 por lo que se rechazó la hipótesis nula de que la muestra proviene de una distribución normal.

A continuación se muestra la matriz de correlación entre las variables de estudio:

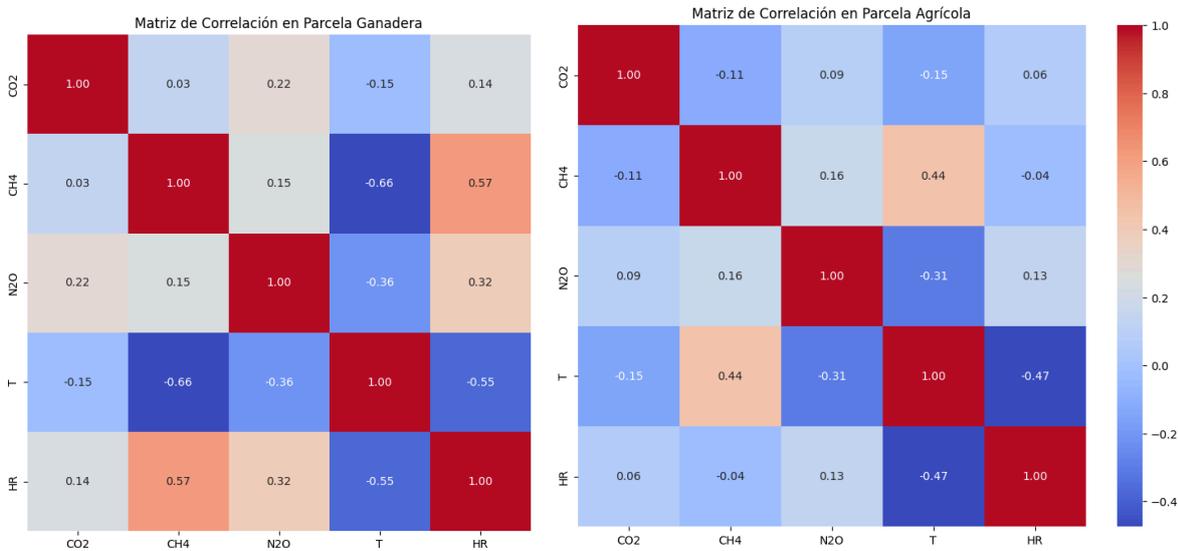


Figura 13. Matriz de correlación de la variables de estudio para las parcelas agrícolas y ganaderas

La Figura 13 muestra para la parcela agrícola que las correlaciones entre las variables son débiles, aunque se destacan una correlación positiva entre variables CH₄ y T con un valor de 0,44, y una correlación negativa entre T y HR con un valor de -0,47; se observa también una correlación negativa entre N₂O y T con un valor de -0,31 y una correlación mucho más baja de -0,11 entre CO₂ y T.

Las correlaciones que se observan para la parcela ganadera son medianamente fuertes en comparación de las parcelas agrícolas, principalmente se observa una correlación negativa importante entre las variables CH₄ y T con un valor de -0,66; otra correlación negativa importante se observa entre las variables HR y T con un valor de -0,55; le sigue en importancia una correlación positiva entre CH₄ y HR con un valor de 0,57; también se puede observar una correlación positiva entre N₂O y HR con un valor de 0,32 y esta variable N₂O con T presenta una correlación negativa de -0,36; entre los gases N₂O y CO₂ se observa una correlación positiva con un valor de 0,22.

6.3. Estimaciones de gases de efecto invernadero para el sector Zalapa

Con los valores de concentraciones diarias se aplicó la Ecuación 1, además se obtuvieron las temperaturas promedio para cada tipo de parcela en grados Kelvin:

Parcela: Agrícola Temperatura promedio: 295,51 K

Parcela: Ganadera Temperatura promedio: 293,28 K

Se calcularon para cada día el rango de concentración dC/dt en un tiempo de 9 horas de muestreo, la tabla de cálculo completa se puede apreciar en el Anexo 5, a partir de dicho cálculo se obtuvo el siguiente resumen de rangos por parcela:

Parcela: Agrícola

CO₂: rango dC/dt promedio: 22.56 ppm/día

CH₄: rango dC/dt promedio: 10.32 ppm/día

N₂O: rango dC/dt promedio: 0.40 ppm/día

Parcela: Ganadera

CO₂: rango dC/dt promedio: 46.28 ppm/día

CH₄: rango dC/dt promedio: 4.64 ppm/día

N₂O: rango dC/dt promedio: 0.48 ppm/día

Los flujos calculados para los gases de efecto invernadero fueron los siguientes:

Tabla 8. Flujos de gases de efecto invernadero en ton/ha/día para las parcelas agrícolas y ganadera.

Parcela	Flujo de CO ₂	Flujo de CH ₄	Flujo de N ₂ O
Agrícola	1,03 x 10 ⁻⁸ ton/ha/día	1,72 x 10 ⁻⁹ ton/ha/día	1,83 x 10 ⁻¹⁰ ton/ha/día
Ganadera	2,13 x 10 ⁻⁸ ton/ha/día	7,78 x 10 ⁻¹⁰ ton/ha/día	2,21 x 10 ⁻¹⁰ ton/ha/día

Tabla 9. Flujos de gases de efecto invernadero en toneladas/día generados en la zona de estudio

Zonas	Área (ha)	Flujo de CO ₂ ton/ha/día	Flujo de CH ₄ ton/ha/día	Flujo de N ₂ O ton/ha/día
Cultivo - Agrícola	55.24	5,66 x 10 ⁻⁸	9,46 x 10 ⁻⁸	1,01 x 10 ⁻⁸
Pastizal- Ganadera	1385.2	2,95 x 10 ⁻⁵	1,08 x 10 ⁻⁶	3,06 x 10 ⁻⁷
Total	1440,44	2,96 x 10⁻⁵	1,17 x 10⁻⁶	3,16 x 10⁻⁷

Tabla 10. Flujos de gases de efecto invernadero en toneladas/año generados en la zona de estudio

Zonas	Área (ha)	Flujo de CO ₂ ton/ha/año	Flujo de CH ₄ ton/ha/año	Flujo de N ₂ O ton/ha/año
Cultivo - Agrícola	55.24	2,07 x 10 ⁻⁵	3,46 x 10 ⁻⁵	3,69 x 10 ⁻⁶
Pastizal- Ganadera	1385.2	1,07 x 10 ⁻²	3,94 x 10 ⁻⁴	1,11 x 10 ⁻⁴
Total	1440,44	1,07 x 10⁻²	4,28 x 10⁻⁴	1,15 x 10⁻⁴
Total en CO₂ eq			*1,1 x 10⁻²	*3,42 x 10⁻²

*Flujos dados en ton CO₂ eq/ha/año

La Tabla 10 muestra los flujos de gases de efecto invernadero totales que se generan en la zona de estudio en función de la cobertura agrícola o ganadera, en ella se puede observar que los mayores flujos corresponden al CO₂ seguido por CH₄ y N₂O; sin embargo, considerando el potencial de calentamiento para metano y óxido nitroso se puede observar que las emisiones en CO₂ eq de CH₄ (0,011 ton CO₂ eq/ha/año) alcanzan a las emisiones de CO₂ (0,0107 ton/ha/año) y las emisiones de N₂O (0,0342 ton CO₂ eq/ha/año) las superan considerablemente.

7. Discusión

7.1. Características físicas y materia orgánica del el suelo

En el análisis de las condiciones físicas y químicas del suelo mostraron diferencias significativas entre los suelos cultivados o como se los ha denominado en este estudio “agrícolas” y los suelos de pastizales o “ganaderos”. Debido a las labores agrícolas como la labranza del suelo, los suelos agrícolas se muestran sueltos y desprovistos de vegetación, muestran una estructura granular y con una densidad aparente baja de $1,3 \text{ g/cm}^3$, estas son características típicas de estos suelos según Brady y Weil (2017), a esto se suma una textura franco arenosa y una porosidad que bordea el 51 % acompañada de un porcentaje de materia orgánica del 2 % un valor relativamente medio, estas condiciones de suelos con buena aireación y de textura ligera en condiciones climáticas secas pueden producir menores concentraciones de N_2O como lo señala Buchkina et al (2013). Es muy probable que las bajas emisiones de N_2O y los demás gases de efecto invernadero en suelos agrícolas no tengan una relación directa con las propiedades físicas, tal como lo señala Ball (2013) aseverando que la variabilidad a escala de campo de las emisiones de gases de efecto invernadero está más controlada por las propiedades bioquímicas que por las físicas, aunque existen diferencias en la producción de gases de efecto invernadero entre los regímenes de labranza que dependerían principalmente de las propiedades físicas. Con relación a la presencia de materia orgánica en el suelo, a pesar de que los análisis muestran mayores concentraciones de materia orgánica en suelos agrícolas, principalmente debido a las fertilizaciones o abonaduras hechas en las parcelas estudiadas, los suelos cultivables tienden a perder carbono orgánico total, contribuyendo así al aumento de las emisiones de CO_2 a la atmósfera, así lo señala De León González et al. (2018), demostrando de esta manera, una de las más probables razones por las que se registraron bajos niveles de CO_2 , en contraste con las parcelas ganaderas.

Una de las características que hipotéticamente se plantearon en el presente estudio fue el efecto de la porosidad y densidad aparente sobre las emisiones de gases de efecto invernadero; una vez realizados los análisis se pudo observar que entre las parcelas ganaderas y agrícolas las emisiones de gases de efecto invernadero no se vieron afectadas por la porosidad, indistintamente se observaron picos en ambas parcelas como en el caso del CO_2 que fueron mayores que las emisiones en suelos agrícolas a pesar de tener una porosidad relativamente menor, en contraste con lo que señala Blume et al. (2022) en que los suelos agrícolas contribuyen significativamente a las emisiones globales de CO_2 , es probable que las mediciones

bajas de CO₂ se deban a una preparación previa del terreno que liberó CO₂ contenido en el suelo de tal manera que al momento de las mediciones con las cámaras las concentraciones fueron bajas, esta afirmación coincide con el estudio de Schley et al. (2017) quien señala que las concentraciones de gases de CO₂ en suelos agrícolas perturbados son bajas. La ganadería puede contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en forma de metano (CH₄) proveniente de la fermentación entérica del ganado y de las prácticas de manejo del estiércol de acuerdo al estudio de Yunga Alava (2022). Además, la actividad ganadera puede tener impactos en la calidad del suelo y la liberación de carbono almacenado en el mismo (i Oltra, 1999).

7.2. Concentraciones de gases de efecto invernadero

El uso de cámaras estáticas cerradas y el uso de sensores de bajo costo para la medición de gases de efecto invernadero, permitieron diferenciar algunas características propias en cuanto a emisiones de CO₂, CH₄ y NO₂ para los suelos agrícolas y ganaderos.

Los flujos de CO₂ en las parcelas ganaderas fueron mayores que en las agrícolas al contrario del CH₄ que tuvo mayores concentraciones en las parcelas ganaderas, mientras que el N₂O mostró un comportamiento similar en ambos tipos de parcelas, estas diferencias se pudieron aclarar realizando el análisis del comportamiento temporal de las concentraciones de los GEI durante el periodo de estudio, así mismo se realizó una correlación con las variables de estudio para determinar si existen dependencias que puedan ayudar a comprender el comportamiento de estos gases en los dos tipos de parcelas.

Al analizar el comportamiento de las fluctuaciones de concentraciones de CO₂ durante el tiempo de estudio se pudo observar que las concentraciones de CO₂ medido en parcelas agrícolas y ganaderas fueron significativamente diferentes, mientras que en parcelas agrícolas las emisiones se mostraron poco fluctuantes alrededor de los 250 ppm, en las parcelas ganaderas duplicaron este valor especialmente en el mes de diciembre de 2022, esto como se indicó previamente, estaría vinculado a que el suelo fue disturbado al momento del arado y preparación del terreno (Schley et al., 2017). En la correlación realizada para este gas en las parcelas agrícolas, la temperatura dentro de la cámara (T) y la humedad relativa (HR) no tuvieron una incidencia importante, con la temperatura una correlación negativa muy baja (-0,19), este resultado difiere del estudio de Taub (2010) quien señala que por lo general, las temperaturas más altas, es posible que se produzca una mayor concentración de CO₂ en una cámara cerrada, sin embargo, la relación exacta entre la temperatura y la concentración de CO₂ puede depender

de otros factores, como la presión y las condiciones específicas del entorno, cuando existe alta presión o bajas temperaturas, puede haber más moléculas de aire en la cámara y más moléculas de CO₂ (Seinfeld y Pandis, 2016), aunque la concentración de CO₂ no haya aumentado realmente, esto se debe a que la presión y la temperatura influyen en la densidad de las moléculas de aire y CO₂ en la cámara (Dossa et al., 2015). Un aspecto importante a señalar en las mediciones de CO₂ es la presencia de plantas que conforman los pastizales (*Pennisetum clandestinum* L.), las cámaras al ser oscuras dificultan el proceso fotosintético pudiendo existir un desequilibrio de las concentraciones de CO₂, sin embargo, no se encontró información específica sobre la relación entre *Pennisetum clandestinum* L. de las cámaras cerradas y la concentración de CO₂ en este contexto.

Las emisiones de CH₄ en las parcelas agrícolas tuvieron un notable repunte durante el mes de diciembre, muy superiores a las parcelas ganaderas, si bien es conocido que hay una relación directa de emisiones de CH₄ y el ganado, es importante señalar que esta relación se da por fermentación entérica y el metano se emite directamente desde los estómagos de los rumiantes a la atmósfera, para el presente estudio dicha relación es muy diferente; de manera general existen grandes emisiones de metano en suelos anegados como en cultivos de arroz (Bhatia et al., 2013), en el análisis de correlación para el presente estudio existe una relación directa entre la temperatura y CH₄, según los registros la temperatura en el mes de diciembre fueron muy altos, llegando a más de 35°, este resultado coincide con el estudio de Pihlatie et al. (2013) que señala que hay una relación directa del metano con la temperatura, además agrega que la humedad es un factor determinante en las emisiones de CH₄, así como el nivel freático, en el caso de nuestra parcelas de cultivos o agrícolas, los riegos en el periodo inicial de crecimiento de las hortalizas fueron periódicos y pudieron haber contenido materia orgánica en suspensión lo que causó un registro de altos niveles de CH₄, por el contrario las concentraciones de metano fueron menores en los suelos ganaderos, debido principalmente a un bajo contenido de materia orgánica como se reportó en los resultados preliminares, pero sobre todo debido a la presencia de amonio y nitrato debido a las deyecciones y estiércol del ganado, este dato lo reporta en el estudio de Chaichana et al. (2018), además hay que señalar que la porosidad en suelos agrícolas es de más del 60 %, esto da lugar a un incremento en la retención de agua tal como se señala en el estudio de Cid-Lazo et al. (2021), además es importante señalar que en la parcela ganadera existe una correlación negativa entre la temperatura y CH₄, y una correlación positiva con la humedad relativa, reiterando que el contenido de agua en el suelo y dentro de la cámara pudieron incrementar los niveles de CH₄ en las parcelas ganaderas.

Las emisiones de N₂O fueron muy bajas en comparación con las de CO₂ y CH₄, esto tiene relación con lo que señala Maier et al. (2022) quienes en su investigación señalan que los niveles bajos de N₂O deben a que el amonio, nitratos, N orgánico que son fuentes de óxido nitroso pueden ser inmovilizados y mineralizados por microorganismos, además son sustancias que son tomadas por las raíces de las plantas para su crecimiento, esto puede explicar el comportamiento similar en ambos tipos de parcelas, sobre todo durante el mes de diciembre donde se muestra una baja correlación negativa entre la temperatura y las emisiones de N₂O, este resultado coincide con el estudio de Li et al. (2022) que señala que existe una relación negativa entre la temperatura del suelo y las emisiones de N₂O, observaron que a medida que la temperatura del suelo aumenta, las emisiones de N₂O tienden a disminuir; con respecto a esto, Gong et al. (2021) señala haber observado un incremento en las concentraciones de N₂O con altas temperaturas, pero registradas en el suelo. Es relevante resaltar que durante el mes de febrero, las emisiones de N₂O experimentaron un notable incremento en ambas parcelas, coincidiendo con el inicio de la temporada lluviosa. Este fenómeno fue descrito por Miller et al. (2022) en su investigación sobre la respuesta de las emisiones de óxido nitroso a eventos de lluvia, donde se encontró una fuerte correlación entre las emisiones de N₂O y el espacio poroso lleno de agua. Estos resultados guardan similitud con los hallazgos del presente estudio, donde se observa un aumento en las concentraciones a partir de dicho mes; es importante considerar a los aportes de fertilizantes nitrogenados como la Urea (46% de N) o abono azul (12-12-17) que se esparcen en los cultivos y en los pastos y que se ajustan a las fechas con altos flujos de N₂O. Estos incrementos por el uso de fertilizantes los Wagner-Riddle et al. (1997), . Hay que destacar que a pesar de que las emisiones de N₂O en parcelas agrícolas y ganaderas fueron muy bajas son consideradas de suma importancia debido al potencial de calentamiento de este gas.

7.3. Estimaciones para la zona de estudio

Las emisiones totales estimadas en ton/ha/año para los gases de efecto invernadero en las zonas de cultivo y pastizales con manejo de ganado en el sector de Zalapa, mostraron emisiones por debajo de los registros para sectores ganaderos en el Ecuador; en el caso del CO₂, las emisiones totales en el sector de Zalapa mostraron un valor de 0,0107 ton/ha/año frente a los promedios nacionales de 0,3 a 0,6 ton/ha/año de acuerdo a la FAO (2019), las emisiones calculadas representan alrededor del 1,78 % de CO₂ frente al promedio nacional. En lo referente al CH₄, las emisiones totales estimadas para el sector de Zalapa son de 0,000428 ton/ha/año frente a los promedios nacionales reportados por la FAO (2019) que son de 0,05 a 0,1 ton/ha/año, las emisiones calculadas representan el 0,43 % con respecto al promedio nacional.

Finalmente las emisiones de N₂O calculadas en Zalapa generan 0,000115 ton/ha/año frente al promedio nacional de 0,01 a 0,02 ton/ha/año, los valores calculados representan alrededor del 0,5 % con respecto al promedio nacional. Finalmente la suma de emisiones de CO₂eq para el sector de Zalapa muestran una contribución total de 0,0559 ton CO₂eq/ha/año.

8. Conclusiones

Al culminar el presente trabajo investigativo se han llegado a las siguientes conclusiones:

Las emisiones registradas por los sensores de bajo costo para los gases de efecto invernadero permitieron observar y analizar el comportamiento de CO₂, CH₄ y N₂O en parcelas agrícolas y ganaderas, este método a pesar de presentar mediciones de manera aún inexacta, ofrecen una alternativa para poder analizar las tendencias de la variabilidad temporal de estos gases, frente a los altos costos de análisis que representan métodos más precisos.

El comportamiento de la variabilidad de los gases de efecto invernadero registradas en las cámaras cerradas estáticas se mostraron independientes a las características físicas de los suelos, lo que hace suponer que están mucho más relacionadas a factores biológicos, de manejo, presencia de humedad, temperatura y variabilidad climática, sin embargo cabe destacar que la porosidad puede tener una participación importante en la generación de CH₄ debido al almacenamiento de humedad.

Se registraron incrementos en N₂O en suelos agrícolas y ganaderos luego de la fertilización con urea y abono azul, lo que podría indicar una mayor actividad microbiana en la generación natural de este gas dentro del ciclo del nitrógeno.

Las emisiones totales en el sector Zalapa son muy bajos con relación a las estimaciones a nivel nacional, para el CO₂ el aporte representa el 1,78% para el CH₄ el 0,43% y para el N₂O el 0,5 % de las emisiones nacionales totales.

9. Recomendaciones

Es importante considerar las siguientes recomendaciones:

Realizar un contraste de las mediciones obtenidas con los sensores de bajo costo con mediciones hechas con sensores especializados para gases de efecto invernadero con la finalidad de obtener una mejor calibración de los sensores.

Se debe complementar el estudio con análisis de suelos que contemplen las concentraciones de amonio, nitratos, N orgánico además de la actividad microbiana presente en los suelos.

Es importante considerar para futuras mediciones la temperatura y humedad presente en el suelo.

10. Bibliografía

- Acuña-Vilchez, B. (2017). *Evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero en tres sistemas de uso de suelos en la microcuenca Tecomapa, municipio de Somotillo, Chinandega Nicaragua* Universidad Nacional Agraria.
- AGROCALIDAD. (2018). Instructivo INT/SFA/10, Muestreo para análisis de suelo. Laboratorio de suelos, foliares y agua. <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/agua8.pdf>
- Arenas, L. N. (2016). *Diseño de cámara estática cerrada y medición de flujos de gases de efecto invernadero (GEI) en suelos*
- Ball, B. C. (2013). Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation. *European Journal of Soil Science*, 64(3), 357-373
- Bárcena, A., Samaniego, J., Peres, W., & Alatorre, J. E. (2020). *La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?* CEPAL.
- Bekku, Y., Koizumi, H., Nakadai, T., & Iwaki, H. (1995). *Measurement of soil respiration using closed chamber method: An IRGA technique* (0912-3814).
- Bhatia, A., Jain, N., & Pathak, H. (2013). Methane and nitrous oxide emissions from Indian rice paddies, agricultural soils and crop residue burning. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 3(3), 196-211.
- Blume, O., Guitard, E., Crann, C., Orekhov, M., Amos, R., Clark, I., ... & Sunohara, M. (2022). Relationships between carbon age and CO₂ efflux in agricultural and drainage ditch soils using the thermonuclear bomb pulse. *Vadose Zone Journal*, 21(5), e20208.
- Bongiorno, G., Bünemann, E.K., Oguejiofor, C.U., Meier, J., Gort, G., Comans, R., Mäder, P., Brussaard, L. & Goede, R. (2019). Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*, 99, 38–50.
- Brady, N.C., and R.R. Weil. 2017. *The Nature and Properties of Soils*, 15th ed. Pearson Education, Boston, MA
- Buchkina, N. P., Rizhiya, E. Y., Pavlik, S. V., & Balashov, E. V. (2013). Soil physical properties and nitrous oxide emission from agricultural soils. *Advances in Agrophysical Research*, 193-220.
- Butterbach-Bahl, K., Sander, B. O., Pelster, D., & Díaz-Pinés, E. (2016). Quantifying greenhouse gas emissions from managed and natural soils. *Methods for measuring greenhouse gas balances and evaluating mitigation options in smallholder agriculture*, 71-96.
- Calvin, K. V., Beach, R., Gurgel, A., Labriet, M., & Loboguerrero Rodriguez, A. M. (2016). Agriculture, forestry, and other land-use emissions in Latin America. *Energy Economics*, 56, 615-624. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.03.020>
- Chaichana, N., Bellingrath-Kimura, S. D., Komiya, S., Fujii, Y., Noborio, K., Dietrich, O., & Pakoktom, T. (2018). Comparison of closed chamber and eddy covariance methods to

- improve the understanding of methane fluxes from rice paddy fields in Japan. *Atmosphere*, 9(9), 356.
- Cid-Lazo, G., López-Seijas, T., Herrera-Puebla, J., & González-Robaina, F. (2021). Variación de la Densidad Aparente para diferentes contenidos de agua en suelos cubanos. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(2), 3-9.
- Corrales Ulate, L. d. M. (2018). Caracterización biofísica y determinación del intercambio de gases de efecto invernadero en las turberas de Talamanca, Costa Rica.
- De Klein, C., & Harvey, M. (2012). Nitrous oxide chamber methodology guidelines. *Ministry for Primary Industries: Wellington, New Zealand*.
- De León-González, F., Fuentes-Ponce, M. H., Bautista-Cruz, A., Leyva-Pablo, T., Castillo-Juárez, H., & Rodríguez-Sánchez, L. M. (2018). Cactus crop as an option to reduce soil C-CO₂ emissions in soils with declining fertility. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 1-10.
- Della Lunga, D., Brye, K. R., Slayden, J. M., Henry, C. G., & Wood, L. S. (2021). Relationships among soil factors and greenhouse gas emissions from furrow-irrigated Rice in the mid-southern, USA. *Geoderma Regional*, 24, e00365.
- Dossa, G. G., Paudel, E., Wang, H., Cao, K., Schaefer, D., & Harrison, R. D. (2015). Correct calculation of CO₂ efflux using a closed-chamber linked to a non-dispersive infrared gas analyzer. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(12), 1435-1442.
- Cuesta, P. y Villaneda, E. (2005). El análisis de suelos: toma de muestras y recomendaciones de fertilización para la producción ganadera. En Cuesta, P. (Ed.) Producción y utilización de recursos forrajeros en sistemas de producción bovina de las regiones Caribe y valles interandinos (pp 1-10) Red de recursos forrajeros. Subdirección de investigación e innovación. Bogotá: CORPOICA.
- Ecuador, G. d. (2018). *Tercera Comunicación Nacional del Ecuador a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. M. d. Ambiente.
- FAO. (2014). *Estimating greenhouse gas emissions in agriculture*. United Nations.
- FAO. (2018). Soluciones ganaderas para el cambio climático. *FAO*, 1-8. <https://n9.cl/4h1zd>
- FAO. (2019). *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- FAO. (2019a). *Ganadería climáticamente inteligente en Ecuador*.
- FAO. (2022). *GLEAM 2.0-Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y su potencial de mitigación*. <https://www.fao.org/gleam/results/es/>
- Foley, J.A., N. Ramankutty, K.A. Brauman, J.S. Gerber, M.T. Johnston, D.K. Lenhart, W.J. Matthews, and D.P. Tilman. 2005. Global agricultural land use: Implications for land use change, food security, and ecosystem services. *Science* 309(5732): 570-574
- Fong, W. K., Sotos, M., Doust, M., Schultz, S., Marques, A., & Deng-Beck, C. (2014). Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala

Comunitaria. *World Resources Institute e International Council for Local Environmental Initiatives*.

GADM Loja. (2014). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Loja*.

GADM Loja. (2017). *Ubicación geográfica de Loja*.
<https://www.loja.gob.ec/contenido/ubicacion-geografica>

GADM Loja. (2021). *PDOT General 2021*. Municipio de Loja.

Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., & Tempio, G. (2013). *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Gong, Y., Yue, P., Li, K., Mohammat, A., & Liu, Y. (2021). Different responses of ecosystem CO₂ and N₂O emissions and CH₄ uptake to seasonally asymmetric warming in an alpine grassland of the Tianshan. *Biogeosciences*, 18(11), 3529-3537.

Grossi, G., Goglio, P., Vitali, A., & Williams, A. G. (2019). Livestock and climate change: impact of livestock on climate and mitigation strategies. *Animal Frontiers*, 9(1), 69-76.

Guerrero, J.M., J.M. Moreno, M.A. Sanz, J.A. Sanz, and J.L. Vicente. (2008). Estimation of greenhouse gas emissions from agricultural soils using static closed chambers. *Environmental Pollution* 152(3): 570-577.

Hansen, J. (2004). Defusing the global warming time bomb. *Scientific American*, 290(3), 68-77.

Hutchinson GL, Livingston GP (2001) Vents and seals in non-steady-state chambers used for measuring gas exchange between soil and the atmosphere. *Europ J Soil Sci*, 52:675-682

i Oltra, V. V. (1999). Impactos de la aplicación de políticas sobre Cambio Climático en la forestación del páramo del Ecuador. *Ecología política*(18), 49-53.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). Chapter 10: Emissions from livestock and manure management. In *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme* (Vol. 4, pp. 91).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006a). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. IPCC, Geneva, Switzerland.

Leite, F. F. G. D., Alves, B. J. R., Nóbrega, G. N., Cordeiro, R. C., Cesário, F. V., Cambareri, G. S., ... & Rodrigues, R. D. A. R. (2021). Checking the progress of using the static chamber method for the measurement of greenhouse gases in Latin America. *Carbon Management*, 12(6), 649-661.

Li, S., Yue, A., Moore, S. S., Ye, F., Wu, J., Hong, Y., & Wang, Y. (2022). Temperature-Related N₂O Emission and Emission Potential of Freshwater Sediment. *Processes*, 10(12), 2728.

Ma, Z., Shrestha, B. M., Bork, E. W., Chang, S. X., Carlyle, C. N., Döbert, T. F., Sobrinho, L. S., & Boyce, M. S. (2021). Soil greenhouse gas emissions and grazing management in northern temperate grasslands. *Science of the total environment*, 796, 148975.

- MacDonald, J. A., Skiba, U., Sheppard, L. J., Hargreaves, K. J., Smith, K. A., & Fowler, D. (1996). Soil environmental variables affecting the flux of methane from a range of forest, moorland and agricultural soils. *Biogeochemistry*, 34, 113-132.
- MAE. (2012). Estrategia Nacional del Cambio Climático del Ecuador. *Gobierno Nacional de La República Del Ecuador*, 153.
- MAE. (2015). *Primer Informe Bienal de Actualización del Ecuador a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.
- MAE. (2016). Reporte del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del año 2010 de Ecuador. In *Ministerio del Ambiente de Ecuador*.
- MAE. (2017). Tercera Comunicación Nacional del Ecuador a la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. In *Ministerio del Ambiente del Ecuador*.
- Maier, R., Hörtnagl, L., & Buchmann, N. (2022). Greenhouse gas fluxes (CO₂, N₂O and CH₄) of pea and maize during two cropping seasons: Drivers, budgets, and emission factors for nitrous oxide. *Science of the Total Environment*, 849, 157541.
- MAE-MAGAP, (2015): Protocolo metodológico para la elaboración del Mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador continental 2013 - 2014, escala 1:100.000
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., & Gomis, M. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 2.
- Medina-Rosas, P. (2014). Notas sobre la acidificación del océano. In *Temas sobre investigaciones costeras* (pp. 28).
- Miller, L. T., Griffis, T. J., Erickson, M. D., Turner, P. A., Deventer, M. J., Chen, Z., ... & Frie, A. L. (2022). Response of nitrous oxide emissions to individual rain events and future changes in precipitation (Vol. 51, No. 3, pp. 312-324).
- Millenium Ecosystem Assesment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (10 de mayo 2023). ¿Qué es el cambio climático?. Acción por el clima.
- Palacios, J., Falcón, N., & Muñoz, E. (2015). Diseño y construcción de sensores automatizados de gases de efecto invernadero en la baja troposfera.
- Picot, B., Paing, J., Sambuco, J. P., Costa, R. H. R., Rambaud, A. & Shilton, A. N. (2003). Biogas production, sludge accumulation and mass balance of carbon in anaerobic ponds. *Waste Stabilisation Ponds: Pond Technology for the New Millennium*, 48, 243-250.
- Pihlatie, M. K., Christiansen, J. R., Aaltonen, H., Korhonen, J. F., Nordbo, A., Rasilo, T., ... & Pumpanen, J. (2013). Comparison of static chambers to measure CH₄ emissions from soils. *Agricultural and forest meteorology*, 171, 124-136.
- Prasad, R. J., Sourie, S. J., Cherukuri, V. R., Fita, L., & Merera, C. E. (2015). Global warming: Genesis, facts and impacts on livestock farming and mitigation strategies. *Int. J. Agric. Innov. Res*, 3, 2319-1473.

- Rajasekar, P., & Selvi, J. A. V. (2022). Sensing and analysis of greenhouse gas emissions from rice fields to the near field atmosphere. *Sensors*, 22(11), 4141.
- Ramankutty, N., A.P.C. da Silva, P.C.H. Hulme, and J.A. Foley. (2006). The global distribution of human-induced land use change. *Global Environmental Change* 16(1): 20-39.
- Rosenstock, T. S., Mpanda, M., Pelster, D. E., Butterbach-Bahl, K., Rufino, M. C., Thiong'o, M., Mutuo, P., Abwanda, S., Rioux, J., & Kimaro, A. A. (2016). Greenhouse gas fluxes from agricultural soils of Kenya and Tanzania. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(6), 1568-1580.
- Rozanski, K., & Fowler, S. (1989). *Estudios oceánicos mundiales, el efecto invernadero y el cambio climático: investigación de sus interrelaciones*. United Nations Environment Programme–UNEP.
- Rumpel, C. & Kögel-Knabner, I. (2011). Deep soil organic matter - a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 338, 143–158.
- Saynes Santillán, V., Etchevers Barra, J. D., Paz Pellat, F., & Alvarado Cárdenas, L. O. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 83-96.
- Schley, I., Ruis, S., Blanco, H., Guretzky, J., & Jasa, P. (2017). Temporal Changes in Greenhouse Gas Fluxes and Related Soil Properties Under Long-Term Tillage Systems. *ASA, CSSA and SSSA International Annual*.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- Silva, A.P., Babujia, L.C., Franchini, J.C., Souza, R.A. & Hungria, M. 2010. Microbial biomass under various soil- and crop-management systems in short- and long-term experiments in Brazil. *Field Crops Research*, 119, 20–26.
- Singh, V. P., Dass, P., Kaur, K., Billore, S. K., Gupta, P. K. & Parashar, D. C. (2005). Nitrous oxide fluxes in a tropical shallow urban pond under influencing factors. *Current science(Bangalore)*, 88, 478-483.
- Smith, P., Cotrufo, M.F., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P.J., Elliott, J.A., McDowell, R., Griffiths, R.I., Asakawa, S., Bustamante, M.M.C., House, J.I., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., West, P.C., Gerber, J.S., Clark, J.M., Adhya, T., Scholes, R.J. & Scholes, M.C. (2015). Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *SOIL*, 2, 537–586.
- Stadmark, J. & Leonardson, L. (2005) Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal. *Ecological Engineering*, 25, 542-551.
- Steinfeld, H., & Gerber, P. (2010). Livestock production and the global environment: Consume less or produce better? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(43), 18237-18238.
- Taub, D. (2010). Effects of rising atmospheric concentrations of carbon dioxide on plants. *Nature Education Knowledge*, 1(8).
- Tubiello, F. N. (2015). Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura [recurso electrónico]: un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo.

- Vásconez, P., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica Los Andes Central*, 91-109.
- Villaroel, J. (1988). Manual práctico para la interpretación de análisis de suelos en laboratorio.
- Wagner-Riddle, C., Thurtell, G., Kidd, G., Beauchamp, E., & Sweetman, R. (1997). Estimates of nitrous oxide emissions from agricultural fields over 28 months. *Canadian Journal of Soil Science*, 77(2), 135-144.
- Yang, S., Liu, Y., Wu, N., Zhang, Y., Svoronos, S., & Pullammanappallil, P. (2019). Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas. *Renewable Energy*, 138, 224-229.
- Yacob, S., Ali Hassan, M., Shirai, Y., Wakisaka, M. & Subash, S. (2006). Baseline study of methane emission from anaerobic ponds of palm oil mill effluent treatment. *The Science of the Total Environment*, 366, 187-196.
- Yunga Alava, D. C. (2022). *Rumiantes y emisión de gases de efecto invernadero BABAHOYO: UTB, 2022*].
- Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. (2019). Infrared CO₂ Sensor Module Model: MH-Z19B. User's manual. <https://www.winsen-sensor.com/d/files/MH-Z19B.pdf>
- Zinn, Y.L., Lal, R. & Resck, D.V.S. (2005). Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. *Soil and Tillage Research*, 84, 28–40.

11. Anexos

Anexo 1. Formato de encuesta aplicada durante los sondeos a propietarios



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
MAESTRÍA EN BIODIVERSIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO

La presente encuesta se efectúa con fines académicos para recopilar información agropecuaria y de gestión de la tierra en el sector sub urbano de la ciudad de Loja

Sondeos a los propietarios de la tierra en el sector de estudio

Código		
UNL	CR	

Datos generales

Fecha de aplicación: _____ - _____-2022

Nombre del propietario: _____

Sector: _____

1. Dentro de su predio (propiedad), ¿Qué usos le da a su terreno?

Tipos	Extensión (ha)
Agrícola	
Ganadero	

GANADERO

2. ¿Cuántos animales tiene según la categoría de ganado?

Categorías principales	Clase	Cant	Tipo de manejo			Raza
			Sogueo	Suelto	Estabulado	
Bovino	Lechero					
	Cárnico					
	Doble propósito					

3. ¿Cómo es la gestión del estiércol del ganado?

Sistema de gestión del estiércol	Cantidad
Laguna anaeróbica	
Cama profunda	

Almacenaje de sólidos	
-----------------------	--

4. Usos de la tierra presentes en la finca

Usos de la tierra	Área (ha)	Tipo de pasto/cultivo
Pastura natural		
Pastura mejorada		
Cultivos ciclo corto		
Cultivos perennes		

**5. ¿Piensa en incrementar el número de animales en la ganadería y en qué cantidad?
Por tipo de ganado**

Si No

Cantidad:

AGRÍCOLA

6. Manejo del cultivo

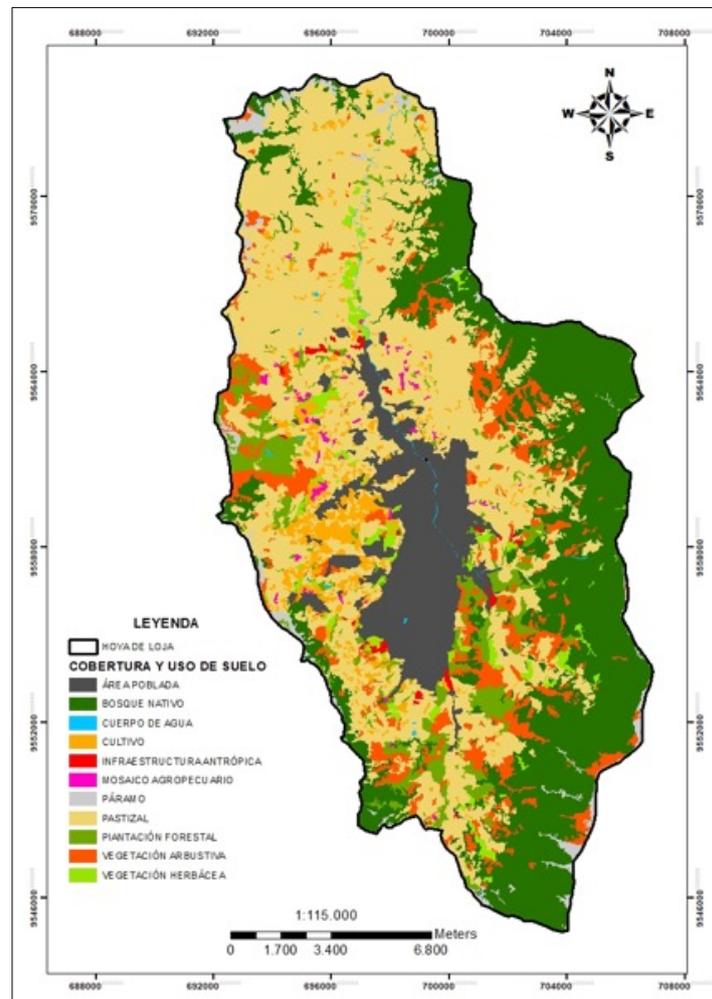
Tipo de cultivo	Fecha de siembra	Cantidad de riegos	Forma de riego	Forma de preparación terreno	Profundidad de aradura

a. ¿Usa algún tipo de fertilizante para sus cultivos, que tipo?

Tipo de cultivo	Tipo de fertilizante	Fertilizante sintético		Urea		Cal		Abonos orgánicos (desechos, guano)	
		Cant	Frec	Cant	Frec	Cant	Frec	Cant	Frec

GRACIAS POR SU COLABORACIÓN

Anexo 2. Mapa de cobertura y uso de suelo de la hoya de Loja



Fuente: obtenido del proyecto 21-DI-FARNR-2021

Anexo 3. Código de calibración de sensores electroquímicos

```
#include "RTClib.h"
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <DHT.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Time.h>
#include <TimeLib.h>

//File DatosGEInv;

RTC_DS3231 rtc;

char daysOfTheWeek[7][12] = {"Domingo", "Lunes", "Martes", "Miércoles", "Jueves", "Viernes",
" Sábado"};
```

```

const int chipSelect = 53;
unsigned long tiempo_inicio;
unsigned long tiempo_muestreo = 1800000 #muestreo cada 30 minutos
#include "RTClib.h"
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <DHT.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Time.h>
#include <TimeLib.h>

//File DatosGEInv;

RTC_DS3231 rtc;

char daysOfTheWeek[7][12] = {"Domingo", "Lunes", "Martes", "Miércoles", "Jueves", "Viernes",
"Sábado"};
const int chipSelect = 53;
unsigned long tiempo_inicio;
unsigned long tiempo_muestreo = 1800000;//sample 30 minutos ;

int SENSOR = 2; // pin digital 2 para DH11
DHT dht (SENSOR, DHT11);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4); // set the LCD address
  dht.begin();
  lcd.backlight();
  setTime(12, 39,20 , 17, 01, 2023);
  if (! rtc.begin()){
    Serial.println("RTC no está funcionando");
    Serial.flush();
    while (1) delay(10);
  }

  if (rtc.lostPower()){
    Serial.println("RTC poder perdido, vamos a configurar el tiempo!");
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  }
  Serial.print("Iniciando Memoria SD ");
  if (!SD.begin(53)) {
    Serial.println("Error no se puede leer SD! :( ");
    while (1);
  }
  Serial.println("Memoria iniciada correctamente :) ");
}

///// de Aquí

float Sen_Metano(){ //MQ-4
  int adc_MQMet = analogRead(A0); //Lemos la salida analógica del MQ
  float voltaje = adc_MQMet * (5.0 / 1023.0); //Convertimos la lectura en un valor de voltaje
  float RSmet=1000*((5-voltaje)/voltaje); //Calculamos Rs con un RL de 1k
  Serial.println(RSmets);
  float Romet=140.15;
  float am=11.92547341;
  float bm=-0.35714261;
  float metano= pow((RSmet/Romet)/am,(1/bm));
  //float metano= pow(RS/Ro, b)*a;
  String magnitud="Metano";
  Mostrar_lcd(magnitud,metano);
  return metano;
}

```

```

}
float Sen_CO2(){ //MZH19B
  int adjustedADC = analogRead(A1); //Lemos la salida analógica del MQ
  Serial.println(adjustedADC);
  String magnitud="CO2";
  Mostrar_lcd(magnitud,adjustedADC);
  return adjustedADC;
}
float Sen_N2O(){ //MQ135
  int adc_MQ_N2o = analogRead(A3); //Lemos la salida analógica del MQ
  float voltaje = adc_MQ_N2o * (5.0 / 1023.0); //Convertimos la lectura en un valor de voltaje
  float RS_N2o=1000*((5-voltaje)/voltaje); //Calculamos Rs con un RL de 1k
  float Ro_N2o=423;
  float an=6.4921;
  float bn=-0.404;
  float N2O= pow(((RS_N2o/Ro_N2o)/an),(1/bn));
  String magnitud="N2O";
  Mostrar_lcd(magnitud,N2O);
  return N2O;
}
float Sen_temp(){
  int temp;
  dht.begin();
  temp = dht.readTemperature();
  String magnitud="Temperatura";
  Mostrar_lcd(magnitud,temp);
  return temp;
}
float Sen_hum(){
  int humedad;
  dht.begin();
  humedad = dht.readHumidity();
  String magnitud="Humedad";
  Mostrar_lcd(magnitud,humedad);
  return humedad;
}

void Mostrar_lcd(String magnitud, float variable){
  LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);
  lcd.backlight();
  lcd.init();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(magnitud);
  //Serial.print(magnitud);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(variable);
  //Serial.print(variable);
  delay(7000);
}
///// Hata aqui

void loop() {
  //LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);
  // lcd.backlight();
  float metano=Sen_Metano();
  float Co2=Sen_CO2();
  float N2o=Sen_N2O();
  float temperatura=Sen_temp();
  float humedad=Sen_hum();
  if ((millis() - tiempo_inicio) > tiempo_muestreo) //if the sampel time == 30s
  {
    DateTime now = rtc.now(); // tomamos la hora y fecha actuales del RTC

```

```

// Abrimos el fichero. Nota: solo se puede abrir un fichero a la vez. Para abrir un
segundo fichero hay que cerrar el anterior.
File dataFile = SD.open("datos.csv", FILE_WRITE);
// si el fichero esta disponible escribir en el:
if (dataFile) {
  dataFile.print(now.year(), DEC);
  dataFile.print('/');
  dataFile.print(now.month(), DEC);
  dataFile.print('/');
  dataFile.print(now.day(), DEC);
  dataFile.print(' ');
  dataFile.print(now.hour(), DEC);
  dataFile.print(':');
  dataFile.print(now.minute(), DEC);
  dataFile.print(':');
  dataFile.print(now.second(), DEC);
  Serial.println(now.hour(), DEC);
  dataFile.print(' ');
  dataFile.print("Metano: ");
  dataFile.print(metano);
  dataFile.print("; ");
  dataFile.print("CO2: ");
  dataFile.print(Co2);
  dataFile.print("; ");
  dataFile.print("N2O: ");
  dataFile.print(N2o);
  dataFile.print("; ");
  dataFile.print("Humedad: ");
  dataFile.print(humedad);
  dataFile.print("; ");
  dataFile.print("temperatura: ");
  dataFile.println(temperatura);
  dataFile.close();
  Serial.println("linea");
}
else {
  Serial.println("error abriendo el archivo datalog.txt");
}
dataFile.flush();
tiempo_inicio = millis();
}
}; //sample 1 minuto ;

int SENSOR = 2; // pin digital 2 para DH11
DHT dht (SENSOR, DHT11);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4); // set the LCD address
  dht.begin();
  lcd.backlight();
  setTime(12, 39,20 , 17, 01, 2023);
  if (! rtc.begin()){
    Serial.println("RTC no está funcionando");
    Serial.flush();
    while (1) delay(10);
  }

  if (rtc.lostPower()){
    Serial.println("RTC poder perdido, vamos a configurar el tiempo!");
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  }

  Serial.print("Iniciando Memoria SD ");
  if (!SD.begin(53)) {
    Serial.println("Error no se puede leer SD! :( ");
  }
}

```

```

    while (1);
    }
    Serial.println("Memoria iniciada correctamente :) ");
}

///// de Aquí

float Sen_Metano(){ //MQ-4
    int adc_MQMet = analogRead(A0); //Lemos la salida analógica del MQ
    float voltaje = adc_MQMet * (5.0 / 1023.0); //Convertimos la lectura en un valor de voltaje
    float RSmet=1000*((5-voltaje)/voltaje); //Calculamos Rs con un RL de 1k
    Serial.println(RSmets);
    float Romet=140.15;
    float am=11.92547341;
    float bm=-0.35714261;
    float metano= pow((RSmet/Romet)/am,(1/bm));
    //float metano= pow(RS/Ro, b)*a;
    String magnitud="Metano";
    Mostrar_lcd(magnitud,metano);
    return metano;
}

float Sen_CO2(){ //MZH19B
    int adjustedADC = analogRead(A1); //Lemos la salida analógica del MQ
    Serial.println(adjustedADC);
    String magnitud="CO2";
    Mostrar_lcd(magnitud,adjustedADC);
    return adjustedADC;
}

}

float Sen_N2O(){ //MQ135
    int adc_MQ_N2o = analogRead(A3); //Lemos la salida analógica del MQ
    float voltaje = adc_MQ_N2o * (5.0 / 1023.0); //Convertimos la lectura en un valor de voltaje
    float RS_N2o=1000*((5-voltaje)/voltaje); //Calculamos Rs con un RL de 1k
    float Ro_N2o=423;
    float an=6.4921;
    float bn=-0.404;
    float N2O= pow(((RS_N2o/Ro_N2o)/an),(1/bn));
    String magnitud="N2O";
    Mostrar_lcd(magnitud,N2O);
    return N2O;
}

}

float Sen_temp(){
    int temp;
    dht.begin();
    temp = dht.readTemperature();
    String magnitud="Temperatura";
    Mostrar_lcd(magnitud,temp);
    return temp;
}

float Sen_hum(){
    int humedad;
    dht.begin();
    humedad = dht.readHumidity();
    String magnitud="Humedad";
    Mostrar_lcd(magnitud,humedad);
    return humedad;
}

}

void Mostrar_lcd(String magnitud, float variable){
    LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);
    lcd.backlight();
    lcd.init();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
}

```

```

    lcd.print(magnitud);
    //Serial.print(magnitud);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(variable);
    //Serial.print(variable);
    delay(7000);
}
///// Hata aqui

void loop() {
//LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);
// lcd.backlight();
float metano=Sen_Metano();
float Co2=Sen_CO2();
float N2o=Sen_N2O();
float temperatura=Sen_temp();
float humedad=Sen_hum();
if ((millis() - tiempo_inicio) > tiempo_muestreo) //if the sampel time == 30s
{
    DateTime now = rtc.now(); // tomamos la hora y fecha actuales del RTC
    // Abrimos el fichero. Nota: solo se puede abrir un fichero a la vez. Para abrir un
segundo fichero hay que cerrar el anterior.
    File dataFile = SD.open("datos.csv", FILE_WRITE);
    // si el fichero esta disponible escribir en el:
    if (dataFile) {
        dataFile.print(now.year(), DEC);
        dataFile.print('/');
        dataFile.print(now.month(), DEC);
        dataFile.print('/');
        dataFile.print(now.day(), DEC);
        dataFile.print(' ');
        dataFile.print(now.hour(), DEC);
        dataFile.print(':');
        dataFile.print(now.minute(), DEC);
        dataFile.print(':');
        dataFile.print(now.second(), DEC);
        Serial.println(now.hour(), DEC);
        dataFile.print(' ');
        dataFile.print("Metano: ");
        dataFile.print(metano);
        dataFile.print("; ");
        dataFile.print("CO2: ");
        dataFile.print(Co2);
        dataFile.print("; ");
        dataFile.print("N2O: ");
        dataFile.print(N2o);
        dataFile.print("; ");
        dataFile.print("Humedad: ");
        dataFile.print(humedad);
        dataFile.print("; ");
        dataFile.print("temperatura: ");
        dataFile.println(temperatura);
        dataFile.close();
        Serial.println("linea");
    }
    else {
        Serial.println("error abriendo el archivo datalog.txt");
    }
}
dataFile.flush();
tiempo_inicio = millis();
}
}

```

Anexo 4. Cálculos de concentraciones en función del tiempo dC/dt

Parcela	Fecha	dCdt_CO2	dCdt_CH4	dCdt_N2O
Agrícola	2022-12-08	31.28887555555560	11.951594444444400	0.3325604411111110
Agrícola	2022-12-09	31.06063111111110	11.741086666666700	0.37663011
Agrícola	2022-12-10	30.382988888888900	11.051983333333300	0.37510424
Agrícola	2022-12-11	30.591877777777800	10.90889111111110	0.34219692555555600
Agrícola	2022-12-12	30.262551111111100	10.043431111111100	0.3554503566666670
Agrícola	2022-12-13	29.731363333333300	11.128231111111100	0.3701866555555560
Agrícola	2022-12-14	26.290602222222200	11.404182222222200	0.3505873488888890
Agrícola	2022-12-15	30.76427777777780	11.497888888888900	0.3589071811111110
Agrícola	2022-12-16	27.01366888888890	11.981102222222200	0.37605050777777800
Agrícola	2022-12-17	29.73565666666670	11.592514444444400	0.36948281666666700
Agrícola	2022-12-18	28.661915555555600	11.002218888888900	0.3193796477777780
Agrícola	2022-12-19	25.47250111111110	10.120374444444400	0.3462626833333300
Agrícola	2023-01-10	20.552474444444400	6.621084444444450	0.10552663666666700
Agrícola	2023-01-11	19.49577111111110	6.66976777777780	0.09522018
Agrícola	2023-01-12	22.15769888888890	7.262568888888900	0.10345969666666700
Agrícola	2023-01-13	20.91200888888890	7.63295888888890	0.0946496166666670
Agrícola	2023-01-14	22.051536666666700	7.406855555555600	0.1043514833333300
Agrícola	2023-01-15	17.76378777777780	6.48596111111110	0.0995913577777780
Agrícola	2023-01-16	19.256665555555600	7.66810666666670	0.0955178166666670
Agrícola	2023-01-17	20.465137777777800	6.857513333333300	0.0908320977777780
Agrícola	2023-01-18	18.955414444444400	7.247694444444450	0.1006769622222200
Agrícola	2023-01-19	20.820093333333300	7.46651888888890	0.0949053922222200
Agrícola	2023-01-20	20.994971111111100	7.363894444444400	0.0929666377777780
Agrícola	2023-01-21	20.42589777777780	7.503217777777800	0.10177460666666700
Agrícola	2023-02-02	18.458488888888900	13.07261777777780	0.905644333333300
Agrícola	2023-02-03	18.590400000000000	12.389758888888900	0.885600111111100
Agrícola	2023-02-04	18.41065555555560	12.567165555555600	0.871696888888890
Agrícola	2023-02-05	17.97922222222200	12.58793888888890	0.947671777777780
Agrícola	2023-02-06	19.027477777777800	12.992815555555600	0.842767444444450
Agrícola	2023-02-07	19.3464	12.546456666666700	0.971344222222222
Agrícola	2023-02-08	13.968555555555600	12.157580000000000	0.846553555555560
Agrícola	2023-02-09	16.416233333333300	12.341648888888900	0.655295333333300
Agrícola	2023-02-10	18.01516666666670	12.083913333333300	0.4585465555555500
Agrícola	2023-02-11	18.36588888888890	12.758315555555600	0.587173777777780
Agrícola	2023-02-12	19.369366666666700	13.245775555555600	0.532493777777780
Agrícola	2023-02-13	19.23545555555560	12.198505555555600	0.4261102222222200
Ganadera	2022-12-08	73.85442222222200	2.765772222222200	0.3416847777777800
Ganadera	2022-12-09	75.24956666666670	2.585203333333300	0.388158477777780
Ganadera	2022-12-10	68.60791111111110	2.841030000000000	0.389720477777780
Ganadera	2022-12-11	70.48024444444440	2.538834444444400	0.3987038000000000

Parcela	Fecha	dCdt_CO2	dCdt_CH4	dCdt_N2O
Ganadera	2022-12-12	74.15335555555560	2.655077777777800	0.3598066444444450
Ganadera	2022-12-13	63.67194444444450	2.757575555555560	0.3461131222222200
Ganadera	2022-12-14	69.90693333333330	2.70554	0.3965102777777780
Ganadera	2022-12-15	67.53624444444440	2.573550000000000	0.4106900444444440
Ganadera	2022-12-16	70.77786666666670	2.803073333333330	0.3716668888888890
Ganadera	2022-12-17	67.72186666666670	2.575111111111110	0.3291394777777780
Ganadera	2022-12-18	62.772333333333300	2.650113333333330	0.3714165777777780
Ganadera	2022-12-19	73.325300000000000	2.859545555555560	0.4007660777777780
Ganadera	2023-01-10	49.72273222222220	6.795077777777780	0.1386655866666670
Ganadera	2023-01-11	41.59497333333330	7.117396666666670	0.1179070877777780
Ganadera	2023-01-12	49.881185555555600	6.869883333333330	0.1429475788888890
Ganadera	2023-01-13	50.43965888888890	6.960525555555560	0.1384807466666670
Ganadera	2023-01-14	49.98747888888890	6.436032222222220	0.1569232966666670
Ganadera	2023-01-15	45.02142222222220	6.717257777777780	0.1396236966666670
Ganadera	2023-01-16	47.75789111111110	6.069377777777780	0.14494250333333300
Ganadera	2023-01-17	47.27171888888890	6.645393333333340	0.13321555444444400
Ganadera	2023-01-18	48.374365555555600	5.91691	0.13920054222222200
Ganadera	2023-01-19	38.412457777777800	6.95195	0.14249585666666700
Ganadera	2023-01-20	48.65338333333330	6.875982222222220	0.1350254511111110
Ganadera	2023-01-21	47.46480888888890	6.833873333333330	0.12992368333333300
Ganadera	2023-02-02	20.329955555555600	4.834520666666670	1.073726381111110
Ganadera	2023-02-03	21.257277777777800	4.729557777777780	0.94143217444444400
Ganadera	2023-02-04	20.236333333333300	4.668131111111110	1.0847953655555600
Ganadera	2023-02-05	23.115866666666700	4.204456666666670	1.0622333644444400
Ganadera	2023-02-06	22.953988888888900	4.655586666666670	0.7569766711111110
Ganadera	2023-02-07	21.206077777777800	4.517535555555550	1.1468355544444400
Ganadera	2023-02-08	21.736288888888900	4.481803333333330	0.6067416266666670
Ganadera	2023-02-09	23.31498888888890	4.374728888888890	1.4341378133333300
Ganadera	2023-02-10	23.71126666666670	4.707355555555560	0.87099395
Ganadera	2023-02-11	21.625577777777800	4.589146666666670	0.9682042833333300
Ganadera	2023-02-12	21.529644444444400	4.474481111111110	1.011862218888890
Ganadera	2023-02-13	22.581844444444500	4.233993333333330	0.2919380166666670

Anexo 5. Certificado de traducción del Abstract



LOJA – Ecuador
BFE-LOJA-04-2023-478ST
24 de Abril 2023

CERTIFICADO

A quien interese

Por medio del presente Be Free English


CERTIFICA:

Que, PACCHA ANGAMARCA JONNY MARIA, con cédula N° 1104267834, ha aprobado el nivel A2, según el Marco Común de Referencia Europeo (CEFR), con la siguiente puntuación:

<i>Listening</i>	<i>8,6/10</i>
<i>Speaking</i>	<i>9/10</i>
<i>Reading</i>	<i>10/10</i>
<i>Grammar</i>	<i>8,6/10</i>
<i>Vocabulary</i>	<i>8,5/10</i>

El mencionado estudiante puede hacer uso del presente para los fines legales y personales que estime conveniente.

Atentamente,


Abg. Nicole Campoverde
SERVICE MANAGER




Lic. Sara Espinosa Guzmán
ACADEMIC COORDINATOR BE FREE