

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“EFECTO DEL RIEGO CON ALTERNANCIA DE HUMEDECIMIENTO
Y SECADO EN LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
EN ARROZALES, LAMBAYEQUE”**

Presentada por:

IDA MARIA ECHEGARAY CABRERA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Lima – Perú

2024

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

“EFECTO DEL RIEGO CON ALTERNANCIA DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN ARROZALES, LAMBAYEQUE”

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

ENCONTRAR COINCIDENCIAS CON TODAS LAS FUENTES (SOLO SE IMPRIMIRÁ LA FUENTE SELECCIONADA)

2%

★ Ida Echegaray-Cabrera, Lena Cruz-Villacorta, Lia Ramos-Fernández, Mirko Bonilla-Cordova et al.

"Effect of Alternate Wetting and Drying on the Emission of Greenhouse Gases from Rice Fields on the Northern Coast of Peru", *Agronomy*, 2024

Publicación

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 25 words

Excluir bibliografía

Activo

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“EFECTO DEL RIEGO CON ALTERNANCIA DE HUMEDECIMIENTO
Y SECADO EN LA EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
EN ARROZALES, LAMBAYEQUE”**

Presentada por:

IDA MARIA ECHEGARAY CABRERA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Ph.D. Diego Alejandro Sotomayor Melo.
PRESIDENTE

Mg. Sc. Lena Cruz Villacorta
MIEMBRO

Ph.D. Elizabeth Consuelo Heros Aguilar
MIEMBRO

Ph.D. Lisveth Flores del Pino de Wright
ASESORA

Dra. Lia Ramos Fernández
CO ASESORA

DEDICATORIA

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi madre
por su inquebrantable apoyo y cariño.

A mis admirables tías, quienes han sido mi fuente de
inspiración y han brindado su apoyo constante a lo largo
de mi trayectoria universitaria.

Dedico un especial reconocimiento a mi padre y a mi
querida mamita Nelly, quienes, desde el cielo, han sido
mis guías en cada logro alcanzado.

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto “Implementación de la herramienta tecnológica en el desarrollo de un sistema de precisión con sensores remotos para optimizar el uso del agua y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en arrozales en beneficio de los agricultores de la región Lambayeque” (Proyecto N°PRO501078113-2022-PROCIENCIA-Perú).



A mi asesora Ph.D. Lisveth Flores del Pino por el asesoramiento en cada etapa del desarrollo de la tesis.

A mi co-asesora, Dra. Lia Ramos Fernández por brindarme su paciencia y apoyo desde el principio, además, de los consejos que permitieron terminar esta investigación.

Al Área Experimental de Riego, por el apoyo recibido en la realización de la investigación. Y al equipo de campo de Lambayeque que ayudaron a la realización de mediciones.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. CULTIVO DE ARROZ	4
2.2. CALENTAMIENTO GLOBAL Y LA PRODUCCIÓN DE ARROZ	6
2.2.1. Emisión de metano (CH ₄)	6
2.2.2. Emisión de óxido nitroso (N ₂ O)	7
2.3. TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	8
2.3.1. Cámara estática cerrada	8
2.3.2. Covarianza de remolinos.....	9
2.4. ANTECEDENTES.....	10
III. MATERIALES Y MÉTODOS	13
3.1. ZONA DE ESTUDIO	13
3.1.1. Caracterización meteorológica.....	14
3.1.2. Caracterización del suelo	15
3.2. MANEJO DEL RIEGO.....	15
3.3. MANEJO DEL CULTIVO	17
3.4. MATERIALES Y EQUIPOS.....	18
3.5. PROCEDIMIENTO	18
3.5.1. Comparación entre cámaras estáticas cerradas transparente y opacas.....	18
3.5.2. Análisis de GEI	24
3.5.3. Potencial de Calentamiento global (GWP)	26

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1. COMPARACIÓN ENTRE CÁMARAS ESTÁTICAS CERRADAS TRANSPARENTES Y OPACAS.....	27
4.2. ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CH ₄ Y N ₂ O.....	29
4.2.1. Dinámica de las emisiones de CH ₄	29
4.2.2. Dinámicas de las emisiones de N ₂ O	33
4.3. EMISIONES ACUMULADAS DE CH ₄ Y N ₂ O.....	37
4.3.1. Rendimiento del grano, GWP, YGWP y factores de emisión	39
V. CONCLUSIONES	42
VI. RECOMENDACIONES	44
VII. BIBLIOGRAFÍA	45
VIII. ANEXOS	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de la cámara transparente y opaca	9
Tabla 2. Flujo máximo de las emisiones de CH ₄ y N ₂ O con riego continuamente inundado y tratamientos AWD según diversos autores.	12
Tabla 3. Análisis físico químico del suelo.....	15
Tabla 4. Análisis físico químico del agua de riego	17
Tabla 5. Equipos, materiales e insumos utilizados.....	18
Tabla 6. Flujo de emisiones de CH ₄ en $mg\ m^{-2}h^{-1}$	27
Tabla 7. Flujo de emisiones de N ₂ O en $mg\ m^{-2}h^{-1}$	27
Tabla 6. Flujo de las emisiones de CH ₄ y N ₂ O con riego continuamente inundado y tratamientos AWD.....	33
Tabla 7. Efecto de los regímenes de riego y sus niveles en el rendimiento del arroz, las emisiones de CH ₄ y N ₂ O, el factor de emisión, GWP y YGWP.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del área experimental, INIA - Vista Florida, Lambayeque.....	13
Figura 2. Variación de la Ta (a), HR (b), Rs (c) y Vv (d) cada cinco minutos durante la hora de monitoreo con la estación automática portátil. Variación diaria de Ta y P acumulada durante el desarrollo del cultivo (e) con la estación automática vista Florida SENAMHI.	14
Figura 3. Piezómetro de PVC, donde NT es el nivel terrestre, NA es el nivel de agua y H es la profundidad del riego, característico en los diferentes niveles AWD.....	16
Figura 4. Monitoreo de GEI y fertilización nitrogenada (a). Fenología del cultivo (b).	18
Figura 5. Plano de cámara estática cerrada transparente.	20
Figura 6. Plano de cámara estática cerrada opaca.	22
Figura 7. Ubicación del área de estudio en Lima, Perú; mapa del AER y perfil de las parcelas de arroz.....	23
Figura 8. Cámaras estáticas cerradas en campo: transparente (a) y opaca (b).	24
Figura 9. Análisis de correlación de Pearson de CH ₄ entre ambas cámaras.	28
Figura 10. Análisis de correlación de Pearson de N ₂ O entre ambas cámaras.	29
Figura 11. Diagrama Blox Plot de la Variación temporal del flujo de CH ₄ ($mg\ m^{-2}h^{-1}$) bajo régimen de riego CF (a), AWD ₅ (b), AWD ₁₀ (c) y AWD ₂₀ (d).	31
Figura 12. Diagrama Blox Plot de la Variación temporal del flujo de N ₂ O ($mg\ m^{-2}h^{-1}$) bajo régimen de riego CF (a), AWD ₅ (b), AWD ₁₀ (c) y AWD ₂₀ (d).	36
Figura 13 Correlación de Spearman y prueba de Dunn entre tratamientos según la emisión de CH ₄ (a) y N ₂ O (b).....	37

Figura 14. Construcción de cámaras.....	55
Figura 15. Desarrollo de la fase experimental en parcelas de la EEA Vista Florida - INIA, Lambayeque.	57

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: PANEL FOTOGRÁFICO	54
Anexo 2: ANÁLISIS DE SUELO Y AGUA DE RIEGO	58
Anexo 3: ANÁLISIS DE GEI EN CIAT – COLOMBIA	61
Anexo 4: VOLUMENES DE RIEGO	64

RESUMEN

El cultivo de arroz es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) debido al riego continuamente inundado (CF), el cual demanda grandes volúmenes de agua. Como una alternativa de solución, se ha desarrollado el riego de alternancia de humedecimiento y secado (AWD) como estrategia de ahorro de agua. Este estudio se realizó en la Estación Experimental Agraria (EEA) Vista Florida de la región de Lambayeque ubicada en la costa norte del Perú, donde se analizó el efecto del riego AWD a diferentes profundidades (5, 10 y menor a 20 cm con respecto a la superficie) y un control CF, en las emisiones de metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y el rendimiento del cultivo de grano de arroz, variedad INIA 515 – Capoteña. Los tratamientos AWD redujeron las emisiones de CH_4 en un rango del 84 al 99 por ciento, pero aumentaron las de N_2O en un rango del 66 al 273 por ciento. En términos del Potencial de Calentamiento Global (GWP), el tratamiento AWD_{10} demostró una reducción del 77 por ciento, afectando solo en un 2 por ciento el rendimiento de grano de arroz, los cuales oscilaron entre 11,85 y 14,01 t ha⁻¹. Asimismo, este estudio presenta evidencia para la adopción del riego AWD como una estrategia para el uso eficiente de los recursos hídricos y la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en los cultivos de arroz en la zona de estudio en comparación con el riego por inundación continua.

Palabras clave: manejo de agua, potencial de calentamiento global, rendimiento del grano.

ABSTRACT

The cultivation of rice is one of the main sources of greenhouse gas (GHG) emissions due to continuously flooded irrigation (CF), which demands large volumes of water. As an alternative solution, alternate wetting and drying (AWD) irrigation has been developed as a water-saving strategy. This study was conducted at the Experimental Agricultural Station (EEA) in Vista, Florida, in the Lambayeque region located on the northern coast of Peru. Thus, it was analyzed the effect of AWD irrigation at different depths (5, 10, and less than 20 cm below the surface) compared to CF control on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions and rice grain yield, specifically the INIA 515 - Capoteña variety. AWD treatments reduced CH₄ emissions by 84 to 99 percent, but increased N₂O emissions by 65 to 272 percent. In terms of Global Warming Potential (GWP), the AWD₁₀ treatment demonstrated a 77 percent reduction, affecting only a 2 percent decrease in rice grain yield, which ranged between 11,85 and 14,01 t ha⁻¹. Likewise, this study provides sufficient evidence for the adoption of AWD irrigation as a strategy for the efficient use of water resources and the mitigation of GHG emissions in rice cultivation in the study area, compared to continuous flooded irrigation.

Keywords: global warming potential; water management; grain yield

I. INTRODUCCIÓN

El arroz es una fuente de alimentos fundamental para más del 60 por ciento de la población global (Park *et al.*, 2023). Actualmente, se cultiva en aproximadamente 153 Mha, lo que equivale al 11 por ciento de la tierra cultivable del mundo (Rajasekar & Selvi, 2022). Con el crecimiento poblacional en aumento, se estima que la demanda de arroz para el año 2050 aumentará en un 56 por ciento con respecto al nivel de producción de 25,1 millones de toneladas registrado en el 2001 (Islam *et al.*, 2022).

El cultivo de arroz es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (Rajasekar & Selvi, 2022). Estos GEI ejercen una influencia significativa sobre el calentamiento global, ya que tienen potenciales de calentamiento 28 y 273 veces mayores que el del dióxido de carbono (CO₂), respectivamente (Masson-Delmotte *et al.*, 2021).

El sistema de riego empleado en los campos de arroz, la elección de las variedades y la gestión de fertilizantes, tienen un impacto significativo en estas emisiones (Islam *et al.*, 2020). El método de riego tradicional, como el continuamente inundado (CF), consumen elevados volúmenes de agua dulce (3000 - 5000 L kg⁻¹ de arroz) (H. Liang *et al.*, 2022). Lo que ocasiona no solo la pérdida de recursos hídricos y nitrógeno, sino también convierte los campos de arroz en una importante fuente de CH₄ (Liao *et al.*, 2023).

Buenas prácticas de manejo, una adecuada fertilización y variedades genéticamente mejoradas de arroz, pueden reducir las emisiones de GEI en los campos entre un 20 y 50 por ciento (Della Lunga *et al.*, 2023). Además, el cambio climático viene afectando la disponibilidad de agua en la agricultura debido a eventos extremos como inundaciones y daños en la infraestructura de riego (Mallareddy *et al.*, 2023).

Esto amenaza la seguridad alimentaria en países productores de arroz y se requiere estrategias de adaptación para mantener una producción sostenible (L. Liu *et al.*, 2021). En los últimos años, como alternativa, se han implementado métodos de riego por inundación no continuo, que reduce el uso de agua hasta en un 38 por ciento sin afectar el rendimiento

(Habib *et al.*, 2023). Entre estos, se destaca el régimen de riego de Alternancia de Humectación y Secado (AWD) ya que es uno de los más estudiados y empleados a nivel mundial (Islam *et al.*, 2020). Consiste en que el suelo experimente ciclos de humectación y secado, esto produce cambios en la humedad y en las condiciones redox del suelo (Cheng *et al.*, 2022a; Islam *et al.*, 2020; Liao *et al.*, 2023). Se ha comprobado que este régimen de riego puede reducir las emisiones de GEI hasta en un 40 por ciento, ya que reduce las emisiones de CH₄ al aumentar los procesos aeróbicos en los suelos durante el periodo de secado (Cheng *et al.*, 2022a; Habib *et al.*, 2023).

También se menciona que en términos de GWP, la reducción en las emisiones de CH₄ compensan el aumento de la emisión de N₂O (Cheng *et al.*, 2022a; Islam *et al.*, 2020; K. Liang *et al.*, 2023). Sin embargo, algunos estudios afirman que la alternancia de periodos aeróbicos y anaeróbicos aumentan las emisiones de N₂O a través de los procesos de nitrificación (aeróbica) y desnitrificación (anaeróbica) (Gaihre *et al.*, 2023).

Las diferencias en las texturas del suelo, el clima y las prácticas de manejo del campo generan controversia sobre este nuevo régimen de riego y sus resultados en las emisiones de GEI (Ariani *et al.*, 2022; Sha *et al.*, 2022). Otro factor que influye es el umbral de profundidad de secado, ya que las raíces del cultivo de arroz necesitan extraer agua para tener un buen rendimiento y evitar el estrés de la planta (K. Liang *et al.*, 2023). Por lo que, es importante generar información sobre las emisiones de GEI en el cultivo de arroz en diferentes zonas agroecológicas y prácticas de gestión de riego.

Las mediciones a nivel de campo ayudarán a desarrollar datos de referencia para estudios en otros campos de arrozales con características agroecológicas, tipo de suelo y prácticas de gestión similares. Esto permitirá a los agricultores, investigadores y formuladores de políticas, desarrollar estrategias de mitigación y planificación para una agricultura climáticamente inteligente (Alauddin *et al.*, 2020).

1.1. OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio es estimar las emisiones de CH₄ y N₂O bajo riego de ahorro de agua como es el riego de alternancia de humedecimiento y secado (AWD) con nivel de agua a 5 cm, 10 cm y 20 cm respecto al nivel del suelo (AWD₅, AWD₁₀, AWD₂₀), en comparación con el riego convencional de inundación continua (CF) en parcelas de la EEA Vista Florida - INIA, Lambayeque.

Siendo los objetivos específicos los siguientes:

- Comparar las emisiones de CH_4 y N_2O usando cámara estática transparente y cámara estática opaca.
- Cuantificar los flujos de emisiones de CH_4 y N_2O bajo diferentes manejos de riego.
- Evaluar el potencial de calentamiento global (GWP), potencial de calentamiento global a escala de rendimiento (YGWP) y el factor de emisión (EF) bajo diferentes manejos de riego.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. CULTIVO DE ARROZ

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los cultivos alimentarios básicos más importantes, ya que alimentan a más de dos tercios de la población mundial (Kahani & Hittalmani, 2015). El cultivo de arroz ocupa casi una quinta parte de la superficie total de cereales cultivados. Crece en un amplio rango de ubicaciones y bajo una variedad de condiciones climáticas, desde las zonas más húmedas hasta los desiertos más secos (Dey *et al.*, 2018). La planta de arroz es una gramínea anual con tallos redondos, huecos, compuesta por nudos y entrenudos, hojas de lámina plana, unidas al tallo por la vaina y su inflorescencia es una panícula. El tamaño de la planta varía de 0,4 m (enanas) a 7 m (flotantes) (Heros, 2012).

2.1.1. Técnicas de riego en arroz

El suministro adecuado de agua es uno de los factores más importantes para la producción de arroz. El cultivo de arroz padece demasiado por exceso o falta de agua debido a las lluvias irregulares y los patrones del paisaje. La gestión del agua es muy importante ya que garantiza un rendimiento óptimo de los cultivos y salvaguardando la calidad de este recurso.

El sistema de riego tradicional para el cultivo de arroz es por inundación, con un promedio de alrededor de 600 mm de agua utilizada por hectárea al año. Esta práctica se prefiere debido a que la mayoría de las variedades de arroz experimentan un mejor crecimiento y producen mayores rendimientos de grano en suelos inundados en comparación con suelos no inundados. El agua desempeña un papel fundamental en varios aspectos del desarrollo del arroz, incluyendo su fisiología, el estado nutricional y físico del suelo, así como la gestión de malezas. A pesar de los desafíos asociados con el exceso de agua, el arroz tiene la capacidad de aprovechar los beneficios químicos de la inmersión del suelo gracias a su sistema radicular, el cual recibe oxígeno a través del aerénquima en los tallos y los canales lisígenos en las raíces (Datta, 1981).

En las últimas décadas se han investigado nuevas tecnologías de riego para cultivo de arroz con la finalidad para reducir los requerimientos de agua en el arroz y aumentar su

productividad (Dey *et al.*, 2018), entre ellas, la Alternancia de Humedecimiento y Secado (Alternate Wetting and Drying, AWD) el cual se ha convertido rápidamente en una de las tecnologías de riego de ahorro de agua más extendidas en los arrozales (Song *et al.*, 2020).

Alternancia de Humedecimiento y Secado (AWD)

La AWD manipula el régimen de gestión del agua desplazando el nivel freático entre dos umbrales especiales de agua, es decir, el límite superior (UAWD) y el límite inferior (LAWD) para el riego. El suelo del arrozal se deja secar hasta que el nivel freático alcanza el LAWD, entonces se riega hasta el UAWD, siendo estos umbrales los factores más importantes que controlan el rendimiento. Este proceso, que implica el secado e inundación alternativos del suelo, se lleva a cabo desde el macollamiento hasta la fase de llenado del grano. El AWD puede disminuir las pérdidas de agua de riego improductiva en forma de filtración y percolación a los desagües, arroyos o aguas subterráneas. La recomendación actual es que un LAWD de 15 cm de profundidad puede considerarse como un umbral "seguro" de AWD sin afectar el rendimiento, ya que las raíces del arroz pueden seguir tomando agua de las aguas subterráneas posadas (Cheng *et al.*, 2022b).

Los estudios que evalúan la eficiencia del AWD, analizar ciertos criterios como los umbrales de agua entre un riego por inundación continua (en inglés continuous flooding, CF) y los de AWD, además, de comparaciones con el rendimiento, la eficiencia del uso de nitrógeno (en inglés nitrogen use efficiency, NUE) y las emisiones de gases que general (Cheng *et al.*, 2022).

El uso de AWD también se está expandiendo debido a su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de arroz (Reavis *et al.*, 2021). Especialmente las de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). El AWD reduce las emisiones de CH₄ al aumentar los procesos aeróbicos en los suelos de los arrozales durante el periodo de secado. Sin embargo, aumenta las emisiones de N₂O a través de los procesos de nitrificación (aeróbica) y desnitrificación (anaeróbica). Por lo tanto, el AWD afecta posteriormente al potencial de calentamiento global (Global Warming Potential, GWP) y al potencial de calentamiento global a escala de rendimiento (Yield-scaled Global Warming Potential, YGWP) en los suelos de los arrozales (Loaiza *et al.*, 2024).

Cheng *et al.*, (2022) menciona que umbrales más bajos de AWD reducen el consumo de agua de riego y mejora la productividad del agua, siendo influenciados por la textura del suelo. Además, aumenta el rendimiento y la reducción de la productividad del factor parcial

de N. Finalmente, el mismo autor concluye una reducción de GWP y YGWP, ya que la emisión de CH₄ es el principal contribuyente en comparación del N₂O. Estos indicadores complementados a una gestión adecuada de fertilizantes contribuyen a métodos efectivos de mitigación de GEI en los cultivos de arroz.

2.2. CALENTAMIENTO GLOBAL Y LA PRODUCCIÓN DE ARROZ

En condiciones de arrozales sumergidos, el metano (CH₄) se produce debido a las condiciones anaeróbicas, mientras que el óxido nitroso (N₂O) se produce debido a los procesos de nitrificación - desnitrificación de fertilizantes nitrogenados que se aplican tanto en condiciones aeróbicas de tierras altas como condiciones anaeróbicas de tierras bajas. Ambos gases contribuyen al calentamiento global (Global Warming, GW) (Islam *et al.*, 2022).

2.2.1. Emisión de metano (CH₄)

El potencial de calentamiento global (Global Warming Potential, GWP) del metano es 28 veces mayor que el del dióxido de carbono (CO₂) (IPCC, 2021).

Se prevé que la emisión mundial total de CH₄ en algunos años será de 16 a 34 millones de toneladas por año, además, se considera que el 63 por ciento de la emisión total mundial de CH₄ será de origen antropogénico Sander *et al.*, (2014) menciona que la producción de metano es insignificante en condiciones aeróbicas no inundadas, sin embargo, esta información aún cuenta con incertidumbres. El aumento más rápido en la emisión de metano durante 1981-2010 se encontró en humedales naturales y campos de arroz debido al aumento de la superficie cultivada y al calentamiento global (Tian *et al.*, 2015).

El cultivo del arroz emite aproximadamente de 20 a 30 mil toneladas anuales de CH₄ en el mundo (FAOSTAT, 2023) contribuyendo al aumento de la temperatura en la atmósfera. El CH₄ almacenado en el suelo, se puede liberar a la atmósfera a través de tres mecanismos: difusión a través del agua por la inundación del campo, ebullición (pérdida de CH₄ por medio de burbujas en los arrozales) y transporte a través de plantas de arroz (aerénquima).

La principal vía de transporte del CH₄ es a través de la planta, específicamente a través del sistema aerénquima y el espacio intracelular, desde las zonas reducidas hacia la atmósfera, Sin embargo, más del 80 por ciento del metano que se produce, se oxida en la rizosfera y la interfaz de agua de inundación del suelo oxidado (Neue & Roger, 1993). Los espacios de aire bien desarrollados en las hojas, láminas, la vaina de la hoja, el tallo y las raíces

proporcionan un intercambio de gases eficiente entre la atmósfera y el suelo anaeróbico. El O_2 atmosférico se suministra a través del aerénquima a las raíces para la respiración. La difusión de oxígeno desde las raíces del arroz parece constituir una parte importante del poder oxidante, además, de la oxidación enzimática debido a la producción de peróxido de hidrógeno. Otro factor que eleva el potencial de oxidación es la alta presencia de bacterias oxidantes en la rizosfera. Además, de Bont *et al.*, (1978) encontró en la fase de macollamiento, diez veces más actividad de bacterias oxidantes de metano que en la interfase suelo-agua oxidada. En conclusión, la zona aeróbica que rodea la raíz es demasiado delgada para oxidar el CH_4 que se difunde o la rizosfera es, en su mayor parte, anaeróbica (Neue & Roger, 1993).

Otros factores importantes que afectan la emisión de CH_4 es la actividad microbiana, la temperatura del suelo, la acumulación y descomposición de materia orgánica, el potencial redox del suelo, entre otros (Habib *et al.*, 2023).

2.2.2. Emisión de óxido nitroso (N_2O)

El GWP del N_2O es 273 veces mayor que el del CO_2 y su vida útil es de 114 años (IPCC, 2021). Por lo tanto, su potencial de calentamiento global es mucho mayor que el CH_4 . Sin embargo, las cantidades de su emisión son mucho menores que las de CH_4 . Tian *et al.*, (2015) predijeron una emisión global de N_2O de 12,52 millones de toneladas por año. La emisión antropogénica neta de N_2O se estima en 5,3 millones de toneladas por año, de los cuales se pronostican un 66 por ciento a partir de la agricultura y los escenarios de emisiones habituales proyectan una casi duplicación de las emisiones de N_2O para 2050 (Davidson & Kanter, 2014). El mayor aumento en las emisiones de N_2O durante 1981-2010 se produjo en los cultivos de secano debido al aumento de la temperatura del aire y al uso de fertilizantes nitrogenados (Chauhan *et al.*, 2017).

En los campos de arroz las emisiones de N_2O son afectadas principalmente por la humedad del suelo, los sustratos nitrogenados y el carbono orgánico. La aplicación de fertilizante N mineral, aumenta los sustratos nitrogenados disponibles y el oxígeno disuelto del agua de inundación y fortalece los procesos de nitrificación y la desnitrificación (Wang *et al.*, 2019). Además, Khaliq *et al.*, (2019) menciona que alrededor del 50 por ciento de los espacios porosos llenos de agua (en inglés como Water filled pore spaces, WFPS) para el proceso de nitrificación y >80 por ciento de WFPS es óptimo para el proceso de desnitrificación. Esto quiere decir que la humectación de suelos secos también puede causar un aumento en la

emisión de N_2O . Por otro lado, el N_2O se emite desde el suelo por difusión, pero el aumento de la humedad del suelo reduce la nitrificación e induce el proceso de desnitrificación, lo que da como resultado la reducción de la emisión de N_2O debido a la reutilización de nitrato (NO_3^-) (Khaliq *et al.*, 2019b)

Datta, (1981) menciona que existen diversos factores que influyen en la desnitrificación como el potencial de hidrógeno (pH) y el potencial redox (pE), temperatura, materia orgánica, contenido de nitrato-N, periodos de inmersión, gestión de fertilizantes nitrogenados, entre otros.

2.3. TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Existe una gran variedad de metodologías para medir los gases de efecto invernadero, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Las técnicas de balance de masa se basan en la dispersión de gases basada en el viento y son adecuadas para medir el flujo de fuentes pequeñas y bien definidas, como vertederos y potreros de animales. Por otro lado, los enfoques micro meteorológicos, como la covarianza de remolinos, se basan en la medición directa en tiempo real del flujo de gas vertical y pueden proporcionar mediciones directas en áreas extensas. Finalmente, los métodos basados en cámaras se enfocan en el cambio en la concentración de gas en la superficie del suelo mediante el muestreo de una columna de aire atrapado desde la superficie del suelo. Permiten obtener mediciones de áreas pequeñas y numerosos tratamientos, pero están sujetas a altos coeficientes de variación debido a la variación espacial en el flujo de gas del suelo (Collier *et al.*, 2014).

2.3.1. Cámara estática cerrada

Es considerada la forma de medición basada en cámaras más frecuente y fácil de implementar también conocida cámaras "estáticas" o "sin flujo continuo de estado no estacionario". Su mecanismo consiste en atrapar un determinado volumen de aire inmediatamente por encima de la superficie del suelo (espacio de cabeza) dentro de una cámara ventilada durante un período de tiempo típicamente de 20 a 60 minutos (Smith & Conen, 2004). Durante este período, la concentración de gas en este espacio aumenta hasta un nivel que puede determinarse mediante cromatografía de gases. Luego, el flujo se calcula a partir de la tasa de aumento de la concentración de gas a lo largo del tiempo dentro del espacio de cabeza de la cámara (Lambert & Fréchet, 2005). Este cálculo se basa en la

suposición de un aumento lineal en la concentración de los diferentes gases en el espacio de cabeza (Silva *et al.*, 2015).

Es ideal para el estudio de pequeñas parcelas experimentales, sitios diversos sobre terreno variable o en otras situaciones en las que se deben estudiar múltiples ubicaciones distintas, sin inversiones significativas en infraestructura. Los usos experimentales típicos pueden incluir la exploración de prácticas alternativas de gestión del paisaje y su impacto en las emisiones de CO₂, N₂O y/o CH₄ basadas en el suelo, el examen de la dinámica de flujo basada en el paisaje en escenarios de cambio climático inducidos artificialmente o el estudio descriptivo de los ecosistemas y subsistemas naturales y agrícolas. Como herramienta crítica en la medición de GEI y la estimación de flujo, el método de cámara estática se ha evaluado minuciosamente y se han hecho esfuerzos significativos para estandarizar las técnicas para obtener datos y resultados significativos (Collier *et al.*, 2014).

Para la construcción de la cámara estática, es esencial utilizar un material, como el acrílico o el PVC, que sea inerte a los gases objetivo, CH₄ y N₂O. Además, el material debe ser ligero y resistente a la rotura (IAEA, 1992). La opacidad/transparencia de la cámara sigue siendo una cuestión abierta. Cada uno tiene ventajas y En un arrozal, la cámara cubre las plantas de arroz a través de las cuales se desventajas (Tabla 1). emite CH₄, por lo que se deben considerar los posibles efectos de la opacidad/transparencia de la cámara en el crecimiento del arroz y los flujos de gas (Minamikawa *et al.*, 2015). Sin embargo, se necesita una mejor comprensión de la relación entre los flujos de gas y la fotosíntesis del arroz y la temperatura interior en diversas condiciones climáticas para resolver esta cuestión (N. Liu *et al.*, 2023).

Tabla 1: Características de la cámara transparente y opaca

Características	Transparente	Opaca
Fotosíntesis	Mantiene	Restringido
Temperatura	Aumenta	Mantiene
Visibilidad del interior	Alto	Ninguna
Dificultad del traslado	Alto	Bajo
Precio del material	Alto	Bajo
Disponibilidad del material	Bajo	Alto

FUENTE: Minamikawa *et al.*, (2015)

2.3.2. Covarianza de remolinos

La técnica de covarianza de remolinos adopta un enfoque micro meteorológico que permite obtener mediciones de flujo de manera no intrusiva y temporalmente continua en áreas extensas, abarcando desde 0,01 km² hasta 1 km², como es el caso de campos agrícolas.

Aunque se considera el método más directo para medir el flujo, su implementación implica la utilización de instrumentos de alto rendimiento, los cuales suelen ser costosos. Además, presenta exigencias computacionales significativas y se apoya en diversas suposiciones, como la presencia de condiciones de turbulencia completamente desarrolladas y la uniformidad horizontal del área de origen en la dirección del viento (Burba & Anderson, 2010). El concepto de huella se emplea para conectar una región específica de una superficie emisora con una medición micro meteorológica del flujo. En el contexto de una medición de covarianza de remolinos en una superficie heterogénea, la señal resultante está directamente influenciada por la ubicación y el tamaño de la huella asociada. Establecer el área de origen de las mediciones mediante un modelo de huella se revela como una herramienta valiosa para lograr una ampliación precisa de dichas mediciones. (Zhao *et al.*, 2014).

Ni las cámaras ni el método de covarianza de remolinos tienen la capacidad de discernir fuentes de emisión que sean considerablemente más pequeñas que el área que se está midiendo, a menos que se simplifique drásticamente la heterogeneidad de la fuente. Esta limitación resulta especialmente problemática para el método de covarianza de remolinos, ya que la dimensión del área de la fuente suele exceder significativamente la escala de la parcela de estudio, donde se analizan las prácticas de gestión. Como consecuencia, este método no resulta efectivo para identificar fuentes de emisión localizadas. Por lo tanto, evaluar las emisiones en escalas distintas a las medidas realmente presenta desafíos, especialmente en el caso del óxido nitroso, dada la amplia variabilidad tanto en términos temporales como espaciales de las tasas de emisión (van den Heuvel *et al.*, 2009).

2.4. ANTECEDENTES

Se han realizado estudios previos donde evalúan el efecto del riego de inundación continua y secas en la emisión de gases de efecto invernadero como el de (Frisancho, 2020), el cual fue realizado en el Área Experimental de Riego de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), utilizando las cámaras estáticas cerradas acrílicas, además de un protocolo de medición de gases. Esta investigación concluyó que bajo riego inundado se obtuvo mayor producción de CH₄ por las condiciones anaerobias del suelo, y bajo riego con secas controladas, una mayor producción de N₂O por las condiciones aerobias-anaerobias producidas por la humedad del suelo. (Chua, 2020) estimó las emisiones de CH₄ y N₂O en el cultivo de arroz bajo dos condiciones de manejo de riego: inundación (T1) y con secas controladas (T2). Utilizó el modelo biogeoquímico denominado "Desnitrificación y

Descomposición del Carbono del Suelo" (DNDC) y empleó cámaras estáticas cerradas en la UNALM, que reproduce condiciones de escasez de agua representativas de la costa central. Los resultados obtenidos, vinculados al rendimiento del cultivo, arrojaron cifras de 11,96 y 9,42 toneladas por hectárea con una θ del uso del agua de 0.31 y 0.33 kg por metro cúbico para T1 y T2, respectivamente. Esto generó emisiones acumuladas de 673,25 kg CO₂-e y 2290,20 kg CO₂-e para T1 y T2, respectivamente. A nivel mundial, se han llevado a cabo investigaciones que evalúan el impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al emplear el régimen de riego denominado AWD en comparación con el método de inundación continua (CF). La Tabla 2 presenta un resumen de estudios recientes en los cuales se caracterizan diversos factores, como el clima, la cantidad de fertilización nitrogenada, el año del experimento y la temporada en la que se llevó a cabo. Se destaca específicamente el efecto observado en las emisiones máximas de CH₄ y N₂O.

Tabla 2: Flujo máximo de las emisiones de CH₄ y N₂O con riego continuamente inundado y tratamientos AWD según diversos autores.

Sitio	Clima según Köppen	Temporada	Suelo	Año	N* (kg ha ⁻¹)	Emisión CH ₄ (mg m ⁻² h ⁻¹)		Emisión N ₂ O (mg m ⁻² h ⁻¹)		Referencia	
						CF	AWD	CF	AWD		
Alabama, Estados Unidos	Subtropical húmedo	Seca	Franco limoso	2013	105	-	-	0.01	0.06	Gaihre <i>et al.</i> , (2023)	
Daca, Bangladesh	Sabana	Seca	Franco arcilloso	2018	78	35	34	0.13	0.12	Islam <i>et al.</i> , (2020)	
				2019		19	14	0.05	0.05		
Mymensingh, Bangladesh	Monzónico	Seca	Franco limoso	2018	90	7	3	0.03	0.06	Islam <i>et al.</i> , (2022)	
				2019		7	5	0.04	0.03		
Daca, Bangladesh	Sabana	Seca	Franco arcilloso	2018	78	19	17	0.08	0.09	Islam <i>et al.</i> , (2022)	
				2019		20	13	0.09	0.08		
				2020		17	13	0.09	0.08		
Guangzhou, China	Subtropical invierno seco	Seca	Franco arcilloso	2017	180	29	29	0.26	0.3	Liang <i>et al.</i> , (2023)	
		Húmeda		2018		150	25	21	0.2		0.3
		Seca		2019		160	26	25	0.21		0.31
		Húmeda		2019		150	31	31	0.15		0.24
Hubei, China	Verano frío	Húmeda	Franco limoso	2021	180	7	4	0.01	0.2	(Liao <i>et al.</i> , 2023)	
				2022		7	5	0.01	0.23		
Hung Yeng, Vietnam	Subtropical invierno seco	Seca Húmeda	Arcilloso	2017	-	30 84	24 96	- -	- -	(Matsuda <i>et al.</i> , 2022)	
Jakenan, Indonesia Wedarijaksa, Indonesia	Monzónico	Seca	Franco limoso Arcilloso limoso	2020	120	10 1	7 0.8	0.1 0.12	0.1 0.14	(Ariani <i>et al.</i> , 2022)	
Liaoning, China	Climas continentales de verano cálido	Seca	Franco limoso	2017	180	17	3	0.9	1.2	(Sha <i>et al.</i> , 2022)	
				2018		4	1.5	0.3	0.4		
				2019		3	2	0.05	0.09		
Mymensingh, Bangladesh	Monzónico	Seca	Franco limoso	2019	180	7	4	-	-	(Habib <i>et al.</i> , 2023)	
Tamil Nadu, India	Sabana	Húmeda	-	2020	180	28	9	0.5	0.9	Rajasekar & Selvi, (2022)	
		Seca		2021		20	8	0.8	0.8		

* fertilizante nitrogenado

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO

El experimento se realizó de enero a junio del 2023 en la Estación Experimental Agraria (EEA) Vista Florida del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) ($06^{\circ}43'34''$ S, $79^{\circ}46'44''$ W y elevación de 35 m.s.n.m.), zona agroecológica costa tropical ubicada a la altura del *km 8* de la carretera Chiclayo a Ferreñafe en el distrito de Picsi, provincia de Chiclayo, región de Lambayeque. De acuerdo con Köppen y Geiger el clima se clasifica árido y cálido (BWh). El experimento abarcó un área total de 1100 m^2 , dividido en cuatro parcelas de 24 m de largo por 11 m de ancho, cada parcela se dividió en 3 subparcelas (Figura 1).

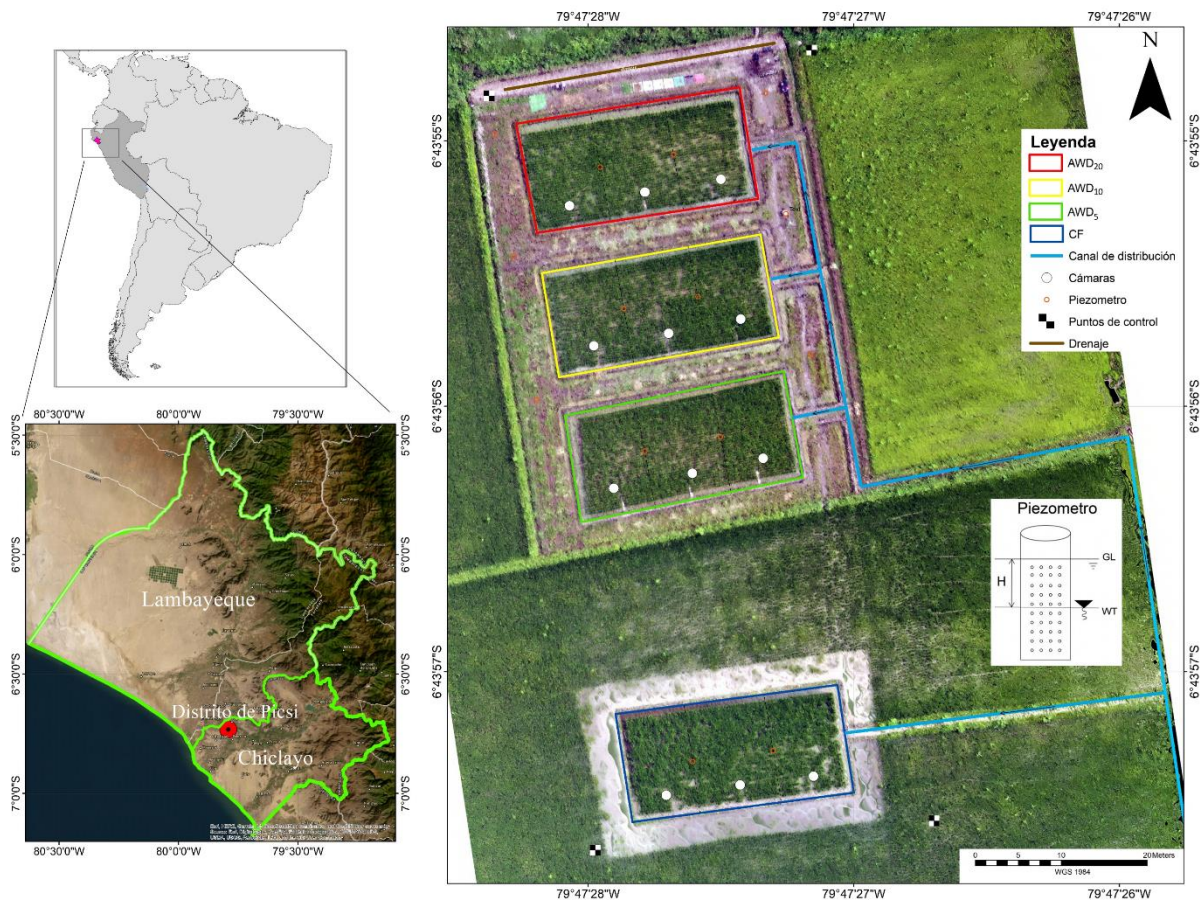


Figura 1. Ubicación geográfica del área experimental, INIA - Vista Florida, Lambayeque.

3.1.1. Caracterización meteorológica

Los datos meteorológicos de la zona de estudio abarcan una serie de variables clave, que incluyen la temperatura del aire (Ta), la humedad relativa (HR), la radiación solar (Rs) y la velocidad del viento (Vv). Estos datos se registraron cada minuto en la estación automática portátil (ATMOS 41, METER, WA, USA) durante el periodo de monitoreo de GEI. Los datos de precipitación diarios (Pa) fueron registrados en la estación meteorológica automática Vista Florida (SENAMHI) durante todo el desarrollo del cultivo (Figura 2).

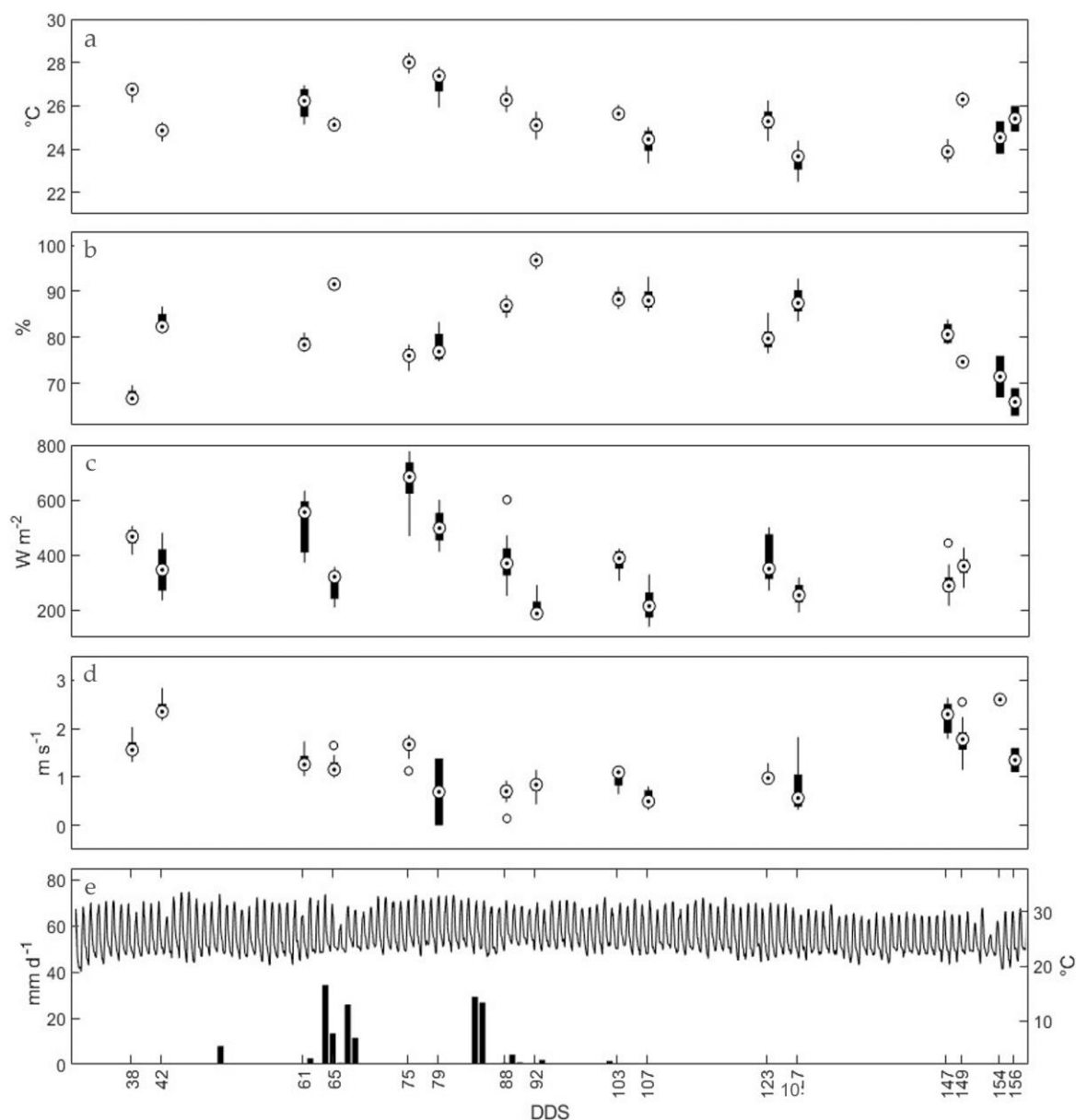


Figura 2. Variación de la Ta (a), HR (b), Rs (c) y Vv (d) cada cinco minutos durante la hora de monitoreo con la estación automática portátil. Variación diaria de Ta y P acumulada durante el desarrollo del cultivo (e) con la estación automática vista Florida SENAMHI.

3.1.2. Caracterización del suelo

El recojo de muestras de suelo fue del tipo compuesta, a una profundidad de 15cm, se realizó antes de la siembra y por cada tratamiento. La muestra fue analizada en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía – UNALM. A continuación, en la Tabla 3, se presentan los resultados del análisis y en el Anexo 2, la información complementaria.

Tabla 3: Análisis físico químico del suelo

Parámetros	Unidad	Valor
Textura		Franco arenosa (26% arena, 39% limo, 35% arcilla)
Conductividad eléctrica	CE dS m ⁻¹	0,42
Potencial de hidrógeno	pH	7,64
Capacidad de intercambio catiónico	CIC meq kg ⁻¹	220
Materia orgánica	MO %	1,22
N total	%	0,11
C orgánico	%	0,71
S disponible	ppm	3,76
Porosidad	%	47,2
Capacidad de campo	CC cm ³ cm ⁻³	29,76
Punto de marchitez	PM cm ³ cm ⁻³	16,27
CaCO ₃	%	4,02
P	ppm	12
K	ppm	376
Porcentaje de sodio intercambiable	PSI	1,14
Relación absorción de sodio	RAS meq L ⁻¹	0,08
Pb total	ppm	14,82
Cr total	ppm	13,5

FUENTE: Información del Análisis de suelos, plantas, agua y fertilizantes de la Facultad de Agronomía (UNALM), 2023

3.2. MANEJO DEL RIEGO

En cada parcela se establecieron diferentes regímenes de riego, la parcela de control con un riego continuamente inundado (CF) con una lámina de agua constante de 5 cm hasta dos semanas antes de la cosecha y las demás parcelas con el riego AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀ que corresponden a una profundidad (H) de -5, -10 y ≤ -20 cm, respectivamente, siendo la referencia el nivel del terreno con respecto a la superficie del suelo según el descenso del

agua, se consideró un diseño observacional con medidas repetidas, con tres cámaras por parcela como repeticiones.

Para controlar la profundidad de inundación de las parcelas se instalaron piezómetros de PVC perforados de 50 cm por debajo de la superficie del suelo, como se muestra en la Figura 3 (Liao *et al.*, 2023; Matsuda *et al.*, 2022).

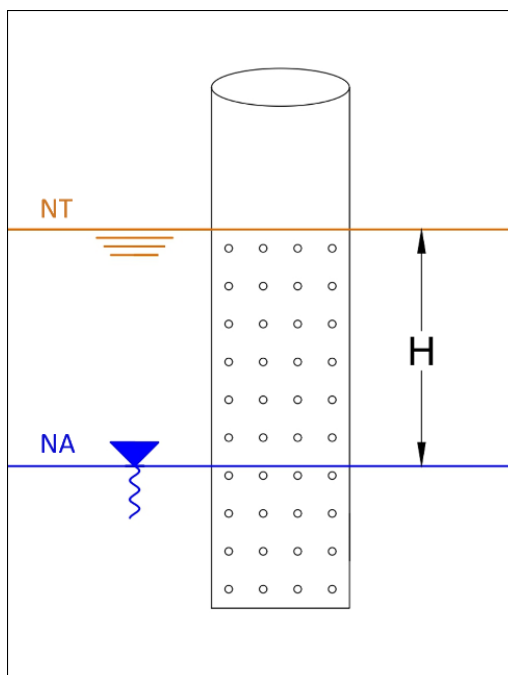


Figura 3. Piezómetro de PVC, donde NT es el nivel terrestre, NA es el nivel de agua y H es la profundidad del riego, característico en los diferentes niveles AWD.

El agua de riego provenía del reservorio Tinajones y se distribuía por el canal principal, que estaba más cerca del tratamiento control. Luego, el agua se dirigía hacia los canales que alimentaban las parcelas de los tratamientos AWD, donde el AWD₅ se encontraba más cerca del dren. El riego se realizaba según los requerimientos hídricos (Anexo 4). El caudal se midió mediante el método volumétrico, controlando el tiempo que tardaba en llenarse un balde con agua del canal de distribución.

Se realizó una caracterización del agua de riego captada directamente del canal de distribución. La muestra fue analizada en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía – UNALM. En la Tabla 4, se presentan los resultados de los análisis.

Tabla 4: Análisis físico químico del agua de riego

Parámetros		Unidad	Valor
Clasificación del agua de riego			C2-S1
Potencial de hidrógeno	pH		7,34
Calcio	Ca ²⁺	meq L ⁻¹	1,91
Magnesio	Mg ²⁺	meq L ⁻¹	0,43
Sodio	Na ⁺	meq L ⁻¹	0,59
Potasio	K ⁺	meq L ⁻¹	0,1
Cloruro	Cl ¹⁻	meq L ⁻¹	1
Bicarbonato	HCO ₃ ²⁻	meq L ⁻¹	1,89
Sulfato	SO ₄ ²⁻	meq L ⁻¹	0,29
Relación absorción de sodio	RAS	meq L ⁻¹	0,55

FUENTE: Información del Análisis de suelos, plantas, agua y fertilizantes de la Facultad de Agronomía (UNALM), 2023

3.3. MANEJO DEL CULTIVO

La siembra de la variedad INIA 515 – Capoteña fue por almácigo el 02 de enero del 2023. Treinta días después de la siembra (DDS), se trasladaron dos plántulas por golpe a una distancia de 0,25 x 0,25 *cm*. La dosis de fertilización fue 250-120-50 en forma de urea, fosfato diamónico y sulfato de potasio, respectivamente (Figura 4). El régimen de cultivo del sitio experimental estuvo dominado por un sistema de rotación estacional de arroz y trigo, sin embargo, la última temporada antes del experimento se realizó una cosecha de semillas de arroz. Luego de dicha cosecha los residuos se quemaron e incorporaron a la preparación de la tierra antes del trasplante. Se aplicó el 100% de P y K y 36% de N en trasplante, el resto de fertilizante nitrogenado se distribuyó en partes iguales en la etapa de inicio de macollamiento, macollamiento y punto de algodón (Porrás-Jorge *et al.*, 2020).

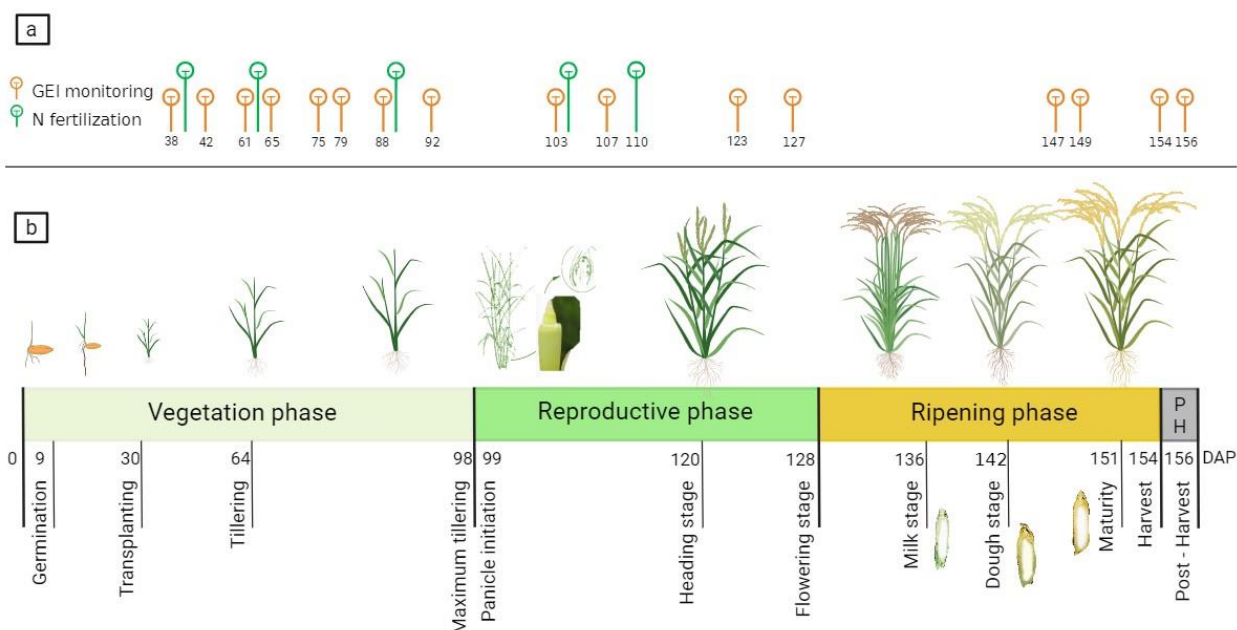


Figura 4. Monitoreo de GEI y fertilización nitrogenada (a). Fenología del cultivo (b).

3.4. MATERIALES Y EQUIPOS

En la Tabla 5, se detalla los equipos y materiales para la construcción de las cámaras de extracción de CH₄ y N₂O.

Tabla 5: Equipos, materiales e insumos utilizados

Equipo, materiales e insumos	Descripción
Cámaras estáticas cerrada (Cámara y base)	Para medición de gases en el campo. Requiere que la base se encuentre a una profundidad de 10 cm.
Ventiladores USB y batería portátil 5 V	Permiten la mezcla de gases dentro de la cámara al momento de la medición.
Sello hidráulico	Materiales que se instalan en la tapa y parte superior de la cámara para evitar la salida e ingreso de gases.
Reductor 1/2", manguera de silicona y llave de tres vías	Materiales de conexión entre la cámara y jeringa para extracción de gas.
Termómetro digital	Se utilizaron para medir la temperatura interna de la cámara y suelo.
Viales	Frasco de vidrio donde se almacenó la muestra de GEI en campo.

3.5. PROCEDIMIENTO

3.5.1. Comparación entre cámaras estáticas cerradas transparente y opacas

En un principio, se planteó el uso de una cámara estática cerrada transparente para el monitoreo de gases de efecto invernadero (GEI) en arrozales. No obstante, debido al peso que presentaban estas cámaras, así como al material acrílico de 6 mm de espesor, su utilización se volvió inviable para el trabajo de campo. Por esta razón, se propuso la

construcción de una cámara liviana de plástico que es empleada por el (CIAT) – Colombia, según Chirinda *et al.*, (2017), siendo esta una cámara de color blanco a la que denominaremos cámara opaca.

El proceso de construcción y armado de la cámara transparente fue una mejora del prototipo propuesto por Frisancho, (2020), mejorando la impermeabilidad en la cámara para evitar fuga de gas en el monitoreo. Esta cámara transparente constaba de una base cuadrada de metal (área $0,26\text{ m}^2$, altura $0,15\text{ m}$) permanentemente instalada en el suelo a una profundidad de 10 cm en cada subparcela (Figura 5). El cuerpo de la cámara de 1 m de altura se colocó sobre la brida de la parte superior de la base con un sello hidráulico (Ariani *et al.*, 2022). La cámara estaba cubierta por una tapa que contenía la conexión para la toma de muestras de gas y el termómetro, similar a la de la cámara opaca. En su interior, se instalaron dos ventiladores conectados a una batería portátil para mezcla del aire (Hu *et al.*, 2023; Park *et al.*, 2023).

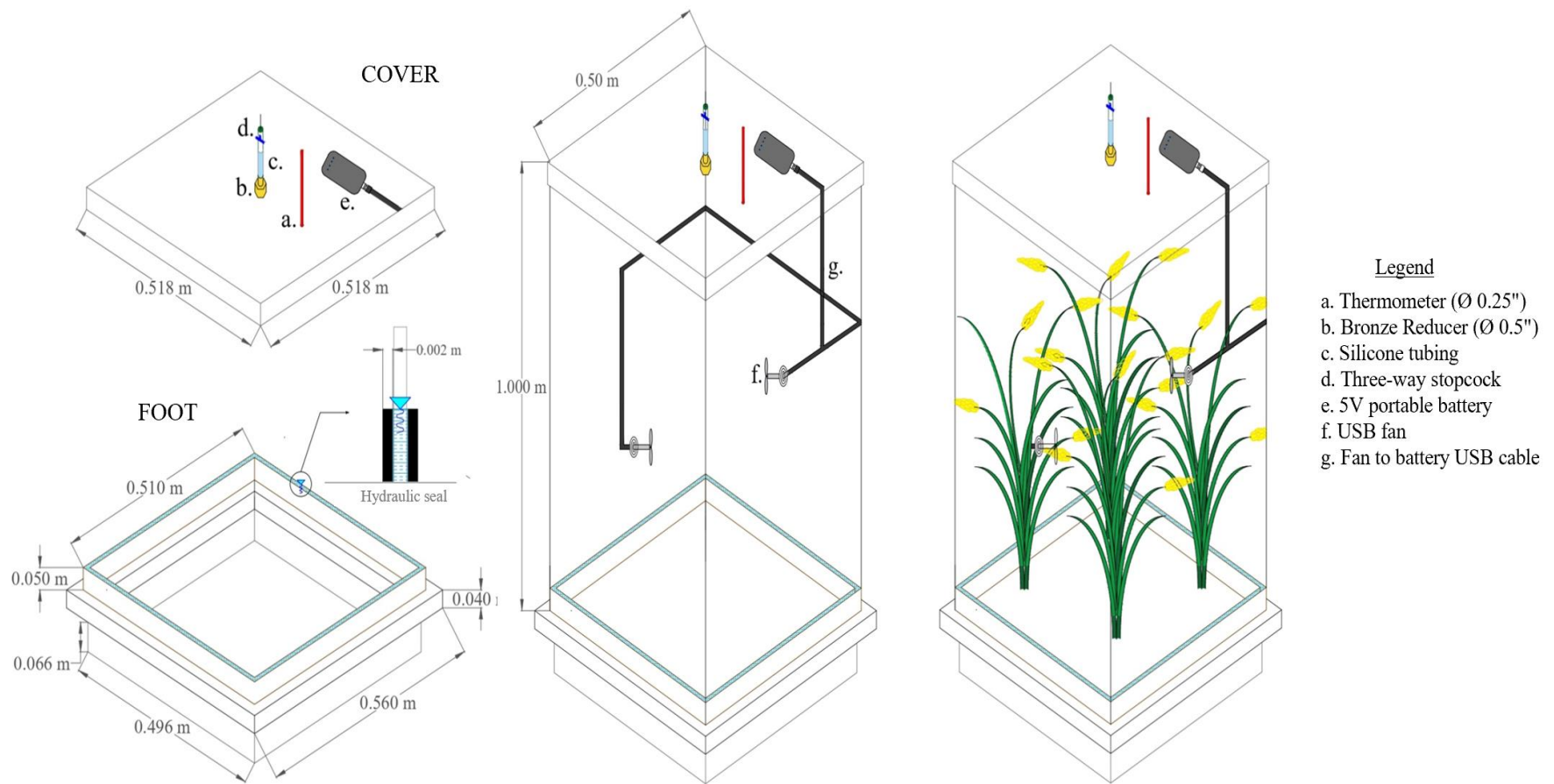


Figura 5. Plano de cámara estática cerrada transparente.

Por otro lado, la cámara opaca se elaboró en base a lo propuesto por Chirinda *et al.*, (2017). Esta cámara de polietileno estaba compuesta por una base de 30 *cm* de altura y un diámetro de 43 *cm*, con agujeros de 5 *cm* de diámetro, espaciados a intervalos de 22 *cm*, que permitieron la entrada y salida del agua. La base estaba unida de forma hermética al bidón, de 84 *cm* de altura y 50 *cm* de diámetro, mediante un sello hidráulico (Figura 6). En uno de los laterales del bidón incorporó una conexión destinada a la toma de muestras de gas. La conexión está compuesta por una manguera siliconada unida a una llave de tres vías, la cual se conecta a una jeringa de 60 *mL* para la extracción de las muestras de gas. Asimismo, se dispone de un termómetro instalado en la parte superior para medir la temperatura interna de la cámara (Lombardi *et al.*, 2022). Con el propósito de asegurar una distribución homogénea de los gases durante la recolección de muestras, se ha instalado un ventilador en su interior, el cual es alimentado por una batería portátil (Chirinda *et al.*, 2017; Della Lunga *et al.*, 2023; Elder & Lal, 2008; Yu *et al.*, 2023).

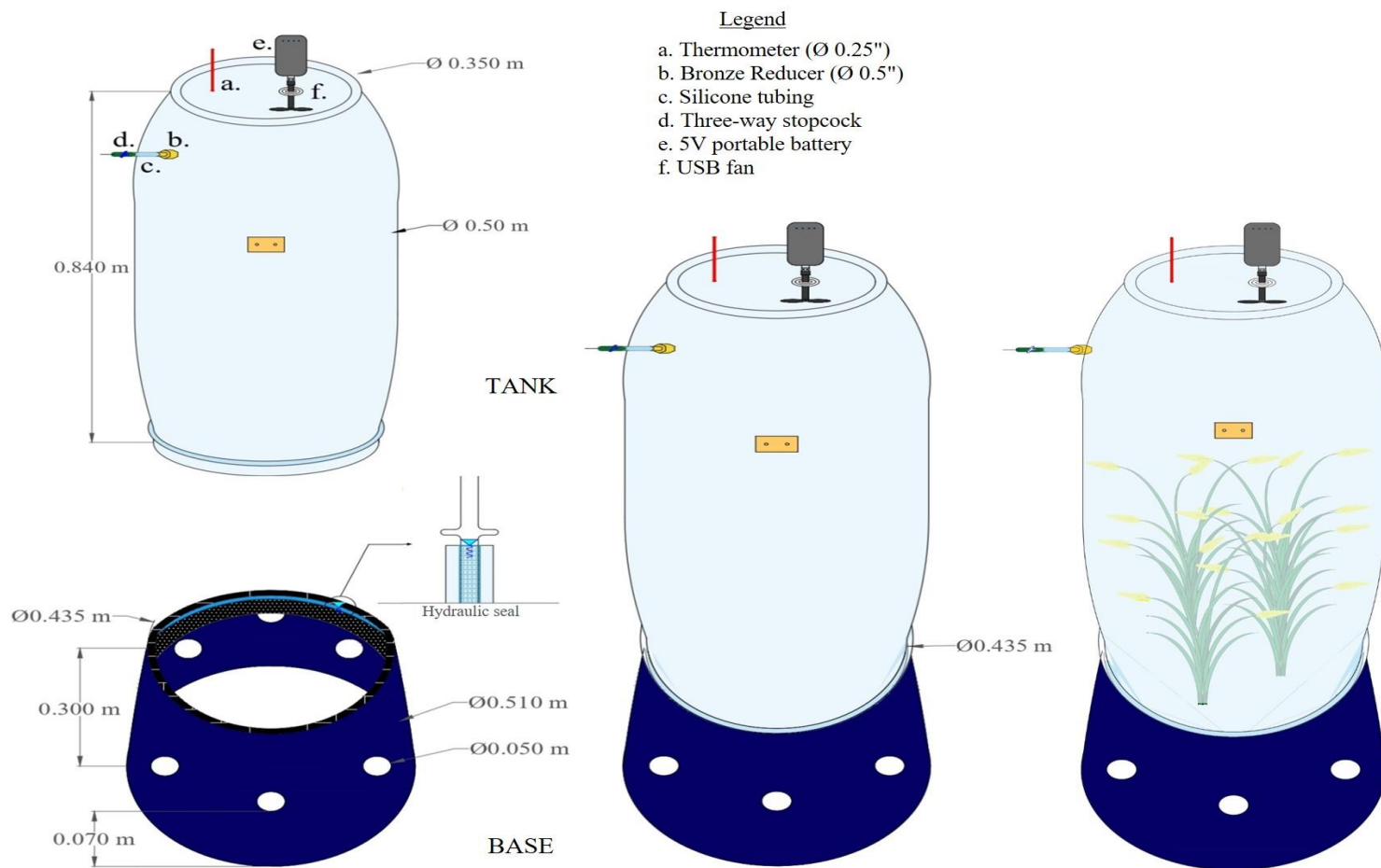


Figura 6. Plano de cámara estática cerrada opaca.

En consecuencia, se realizó un grupo de mediciones piloto comparando las cámaras transparentes y opacas en tres pozas de 2,5 m x 4,0 m, instaladas en el Área Experimental de Riego (AER), ubicado dentro del campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (12° 00' 05" S, 76° 57' 06,5", altitud 233 m.s.n.m.) entre los meses de noviembre del 2022 hasta mayo del 2023 (Ver Figura 7). Con la finalidad de hallar la ecuación de corrección entre cámaras y validar los resultados obtenidos por la cámara opaca en la zona de estudio (Ver Figura 8).

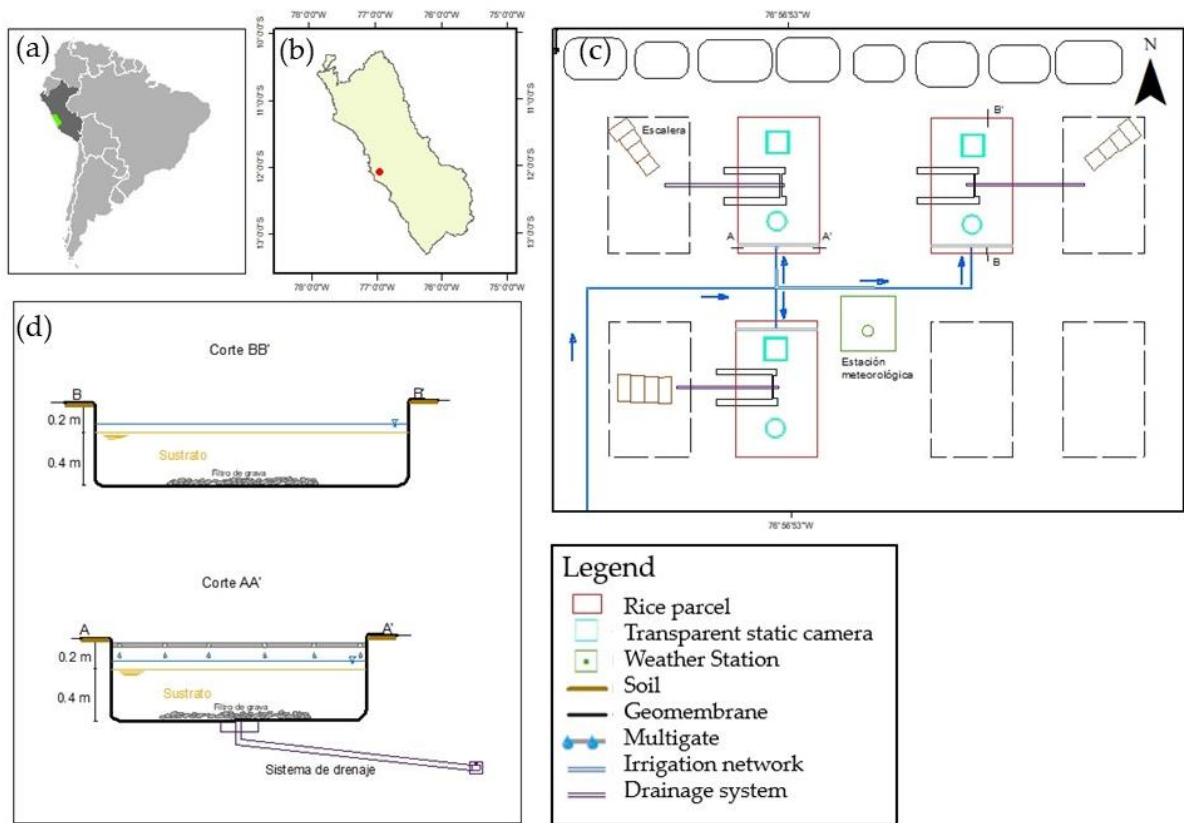


Figura 7. Ubicación del área de estudio en Lima, Perú; mapa del AER y perfil de las parcelas de arroz.



Figura 8. Cámaras estáticas cerradas en campo: transparente (a) y opaca (b).

3.5.2. Análisis de GEI

a. Protocolo de monitoreo

El monitoreo se llevó a cabo el mismo día de la aplicación de fertilización nitrogenada y tres días después de la misma. Después, cada 15 días para evaluar los cambios en la fenología y el manejo del riego. El muestreo se realizó por la mañana entre las 8:00 y las 11:00 a.m., a cielo despejado. Por cada fecha de muestreo se tomaron muestras a los 0, 20, 40 y 60 minutos (Liao *et al.*, 2023). Las muestras obtenidas durante todo el período de crecimiento del cultivo se transfirieron inmediatamente a viales de vidrio de 15 mL vacíos y sellados con un protector de caucho (EXETAINER, Labco Limited, UK) para su posterior medición en el laboratorio.

Las concentraciones de GEI se midieron con un cromatógrafo de gases (GC-2014, Shimadzu, Kyoto, Japan) equipado con detectores de ionización de llama (FID) para CH₄ y captura de electrones (ECD) para N₂O en el Laboratorio de Gases de Efecto Invernadero (CIAT, Cali, Colombia) (Lombardi *et al.*, 2022).

b. Cálculo de emisiones

Los flujos de emisión de CH₄ o N₂O (f) se determinaron a partir de la pendiente a través de una regresión lineal, de las concentraciones en ppm de la lectura cromatográfica de los viales frente al tiempo de cierre de la cámara (Gaihre *et al.*, 2023; Van Dung *et al.*, 2023). Luego, la pendiente se convirtió en masa por unidad de área por unidad de tiempo ($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$), a través de la siguiente ecuación (1) (Hu *et al.*, 2023; Islam *et al.*, 2022):

$$\text{Flujo de emisión de CH}_4 \text{ y N}_2\text{O} = \frac{\text{pendiente (ppm min}^{-1}) \times P \times V_c \times MW \times 60}{R \times T_k \times A_c} \quad (1)$$

Donde P, presión a condiciones normales, V_c, volumen de la cámara de gas en m³, MW, peso molecular del gas respectivo, 60, $min\ h^{-1}$, R, constante de gases de ideales 0.082057 en $atm\ m^{-3}\ kmol^{-1}\ K^{-1}$, T_k, temperatura dentro de la cámara expresada en Kelvin y A_c, área de la cámara en m².

El flujo acumulado de CH₄ o N₂O ($kg\ ha^{-2}$) en cada cámara se obtuvo de acuerdo a la ecuación (2) (Xu *et al.*, 2023):

$$\text{Flujo acumulado de emisión de CH}_4 \text{ y N}_2\text{O} = \sum \frac{f_i + f_{i+1}}{2} \times d \times 0,24 \quad (2)$$

Dónde, f_i y f_{i+1} son los flujos calculados de dos fechas consecutivas ($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$), d es el número de días entre dos fechas de monitoreo y el factor de conversión para 0,24 para obtener el flujo acumulado en $kg\ ha^{-2}$.

Así mismo, el flujo total acumulado de emisiones de CH₄ o N₂O (T), se calculó sumando todos los flujos acumulados, es decir desde la primera fecha de monitoreo hasta la última.

Considerando los resultados obtenidos en la correlación entre la cámara transparente y opaca, se aplicó la ecuación de corrección a la tasa de emisión calculada.

c. Análisis de datos de AWD y CF

Se evaluó la normalidad de la distribución y la homogeneidad de las varianzas de cada tratamiento mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Barlett, respectivamente; los cuales dieron como resultado una distribución no normal por lo cual, se utilizó un diseño observacional con medidas repetidas con prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis. Se compararon las emisiones acumuladas, rendimiento del grano, GWP, YGWP y EF, de cada tratamiento con el grupo testigo (CF) utilizando la prueba de Dunn (Montgomery,

1991). Para el cálculo estadístico se utilizó el programa R studio (v2023.06.1). Todo nivel de significancia se consideró con α de 5%.

3.5.3. Potencial de Calentamiento global (GWP)

Se calculó el GWP del CH₄ y del N₂O se calculó con la ecuación (3):

$$GWP \text{ (kg CO}_2 \text{ equivalente ha}^{-1}\text{)} = (TCH_4 \times 28 + TN_2O \times 273) \quad (3)$$

Donde TCH₄ el total acumulado de emisiones de CH₄ (kg ha⁻¹), TN₂O es el total acumulado de emisiones de N₂O (kg ha⁻¹), 28 y 265 son los valores de GWP para CH₄ y N₂O, respectivamente, de CO₂ en un horizonte de 100 años (Ariani *et al.*, 2022).

El potencial de calentamiento global a escala de rendimiento se calculó con la siguiente, ver la ecuación (4) (Cheng *et al.*, 2022a):

$$YGWP = \frac{PCG}{Yield} \quad (4)$$

Donde YGWP es la emisión total de GEI por unidad de rendimiento (kg CO₂ eq kg⁻¹ rendimiento del grano).

El factor de emisión (EF) se estimó dividiendo una emisión acumulativa de AWD por el periodo de medición de GEI (Islam *et al.*, 2020).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. COMPARACIÓN ENTRE CÁMARAS ESTÁTICAS CERRADAS TRANSPARENTES Y OPACAS

Los flujos que se obtuvieron en ambas cámaras, aplicando la ecuación (1), tanto para el CH₄ y N₂O, como se muestra en la Tabla 5 y Tabla 7, respectivamente.

Tabla 6: Flujo de emisiones de CH₄ en mg m⁻² h⁻¹

Fecha	DDS	Transparente			Opaca		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
16/12/2022	35	0,02	0,10	0,04	0,05	0,00	--
2/01/2023	52	0,03	0,03	0,07	--	0,05	0,04
9/01/2023	59	0,02	0,03	0,04	0,08	0,20	0,03
24/01/2023	74	0,06	0,12	0,18	0,07	0,55	0,09
3/02/2023	84	0,10	0,06	0,54	0,08	--	0,10
6/02/2023	87	0,22	0,22	0,18	0,14	0,17	0,18
9/02/2023	90	0,17	0,20	0,99	0,14	0,23	0,13
20/02/2023	101	1,61	0,73	1,06	0,11	0,33	0,42
24/02/2023	105	1,61	0,77	1,04	0,17	0,30	0,22
28/02/2023	109	2,03	0,77	2,76	0,23	0,38	0,08
4/03/2023	123	1,87	3,63	0,53	2,41	0,70	0,75
17/03/2023	126	3,02	3,35	0,69	1,16	0,73	0,64
30/03/2023	139	0,15	0,96	2,61	0,03	1,05	0,31

Tabla 7: Flujo de emisiones de N₂O en mg m⁻² h⁻¹

Fecha	DDS	Transparente			Opaca		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
16/12/2022	35	0,05		0,05	0,18	0,48	--
2/01/2023	52	0,01	0,21	0,07	0,03	0,01	0,16
9/01/2023	59	0,41	0,40	0,23	0,41	0,36	0,09
24/01/2023	74	0,12	0,18	0,07	0,05	0,43	0,01
3/02/2023	84	0,03	0,00	0,00	0,01	--	0,00
6/02/2023	87	--	0,01	0,00	--	0,02	0,01
9/02/2023	90	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02
20/02/2023	101	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
24/02/2023	105	0,05	0,02	0,02	0,04	0,08	0,07
28/02/2023	109	0,05	0,02	0,05	0,02	0,01	0,02
4/03/2023	123	0,05	0,02	0,00	0,02	0,02	0,01
17/03/2023	126	0,02	0,06	0,05	0,02	0,01	0,01
30/03/2023	139	0,01	0,01	0,01	0,05	0,02	0,03

Luego, se realizó el análisis estadístico de normalidad y distribución. Se concluyó que la distribución fue no paramétrica. En consecuencia, se utilizaron transformaciones de Box-Cox para evaluar los ajustes necesarios.

El R de Pearson, para la relación entre cámaras, del flujo de CH₄ y N₂O, fue 0,823 y 0,693, respectivamente, como se muestra en la Figura 9 y Figura 10, respectivamente. Dando como resultado las ecuaciones 5 y 6:

$$\text{Ln}(fCH_{4,o}) = 1,3796 \text{Ln}(fCH_{4,t}) + 1,1293 \quad (5)$$

Donde $fCH_{4,o}$ es el flujo de emisión de CH₄ proveniente de la cámara opaca y $fCH_{4,t}$ es el flujo de emisión de CH₄ proveniente de la cámara transparente, ambos flujos expresados en $mg\ m^{-2}\ h^{-1}$.

$$\text{Ln}(fN_2O_o) = 0,7723 \text{Ln}(fN_2O_t) - 0,9227 \quad (6)$$

Donde fN_2O_o es el flujo de emisión de N₂O proveniente de la cámara opaca y fN_2O_t es el flujo de emisión de N₂O proveniente de la cámara transparente, ambos flujos expresados en $mg\ m^{-2}\ h^{-1}$.

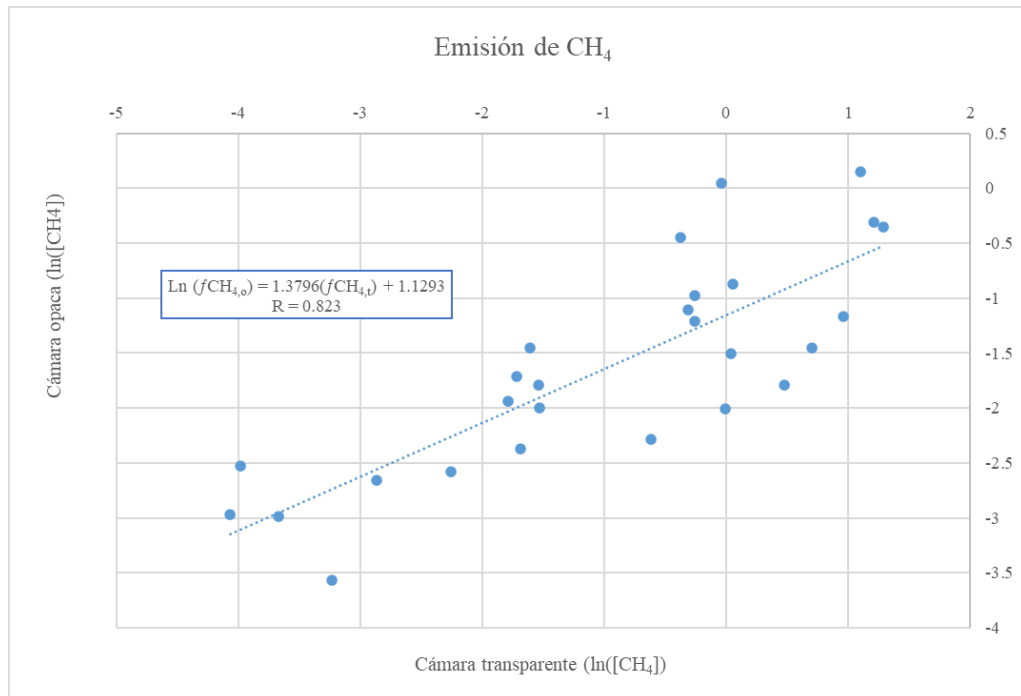


Figura 9. Análisis de correlación de Pearson de CH₄ entre ambas cámaras.

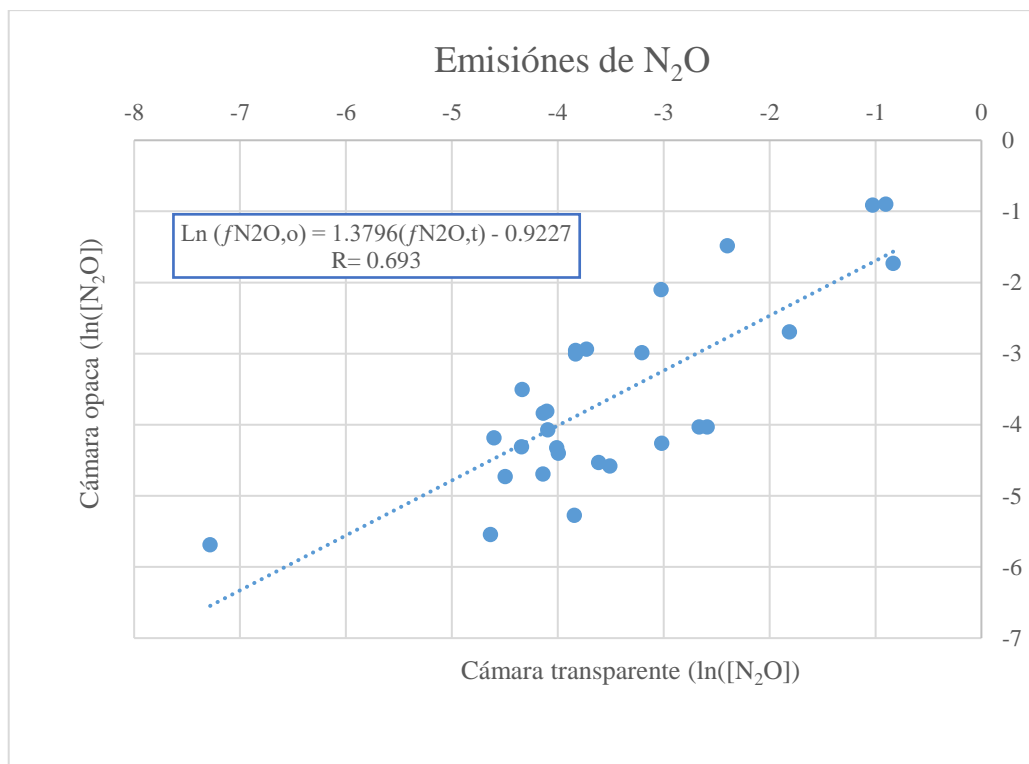


Figura 10. Análisis de correlación de Pearson de N₂O entre ambas cámaras.

Las ecuaciones de correlación se calcularon debido a la disminución de la luz bajo las cámaras opacas durante el muestreo de gases de efecto invernadero (GEI) lo que puede afectar la producción, el transporte o el proceso de emisión de GEI (Luan & Wu, 2014). Además, la ausencia de luz solar reduce la capacidad fotosintética de las plantas al provocar el cierre total o parcial de los estomas, limitando así la absorción de CO₂ externo por las hojas (N. Liu *et al.*, 2023). Dado que este efecto tiene el potencial de reducir la tasa de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a través de las plantas.

4.2. ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CH₄ Y N₂O

4.2.1. Dinámica de las emisiones de CH₄

Se observó la variación temporal del CH₄ en todo el periodo del experimento desde la etapa de germinación hasta postcosecha (Figura 11). Las magnitudes y tendencias del flujo de emisiones de CH₄ variaron con los tratamientos AWD, la fase del cultivo y las características meteorológicas. Se observó un incremento en la emisión durante el inicio de macollamiento (61 y 65 DDS) bajo ambos regímenes de riego AWD y CF, con emisiones que oscilaron entre $0,167 \pm 0,144$ y $2,778 \pm 1,697 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Esta tendencia se mantuvo para la condición de CF, mientras que para los tratamientos con AWD hubo un descenso acelerado (Tabla 8). Se observó un segundo incremento de emisiones de CH₄ en la etapa de punto de

algodón (103 y 107 DDS) bajo ambos regímenes de riego AWD y CF, con emisiones entre $0,028 \pm 0,010$ y $8,124 \pm 2,249 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Los resultados indicaron que las emisiones de CH_4 bajo CF, oscilaron entre $0,025 \pm 0,003$ y $17,924 \pm 2,975 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, fueron significativamente más altas que la de los otros tratamientos con aplicación de AWD. Esto se confirmó con un valor de chi-cuadrado de 11.8605, con 3 grados de libertad y un p-valor de 0,01. Los valores máximos de emisión de CH_4 fueron $2,778 \pm 1,697$, $0,493 \pm 0,189$ y $0,177 \pm 0,086 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀, respectivamente.

El 7 de marzo (62 DDS), se presentó el ciclón tropical no organizado llamado “Ciclón Yaku” estuvo presente cerca de la costa norte y central hasta el 18 de marzo (73 DDS). Esta presencia facilitó la entrada y acumulación de humedad en la vertiente occidental. Como resultado, se generaron lluvias intensas y registros diarios de precipitación sin precedentes a lo largo de la costa norte. Esto afectó significativamente el régimen hídrico durante el período experimental (SENAMHI, 2023).

Las emisiones de CH_4 de los campos de arroz se vieron influenciadas por el régimen de riego AWD (Cheng *et al.*, 2022a). En la Figura 11, se observa que las tasas de emisión más altas fueron bajo el régimen CF ($p < 0,05$). Aunque estas tasas de emisión son comparables a las registradas en otros lugares (Ariani *et al.*, 2022; Islam *et al.*, 2020, 2022; Sha *et al.*, 2022), existen estudios que informan valores superiores (K. Liang *et al.*, 2023; Matsuda *et al.*, 2022; Rajasekar & Selvi, 2022) o inferiores (Habib *et al.*, 2023; Liao *et al.*, 2023). Estas diferencias pueden atribuirse principalmente a la variación estacional, textura del suelo o condiciones climáticas, como se muestra en la Tabla 2.

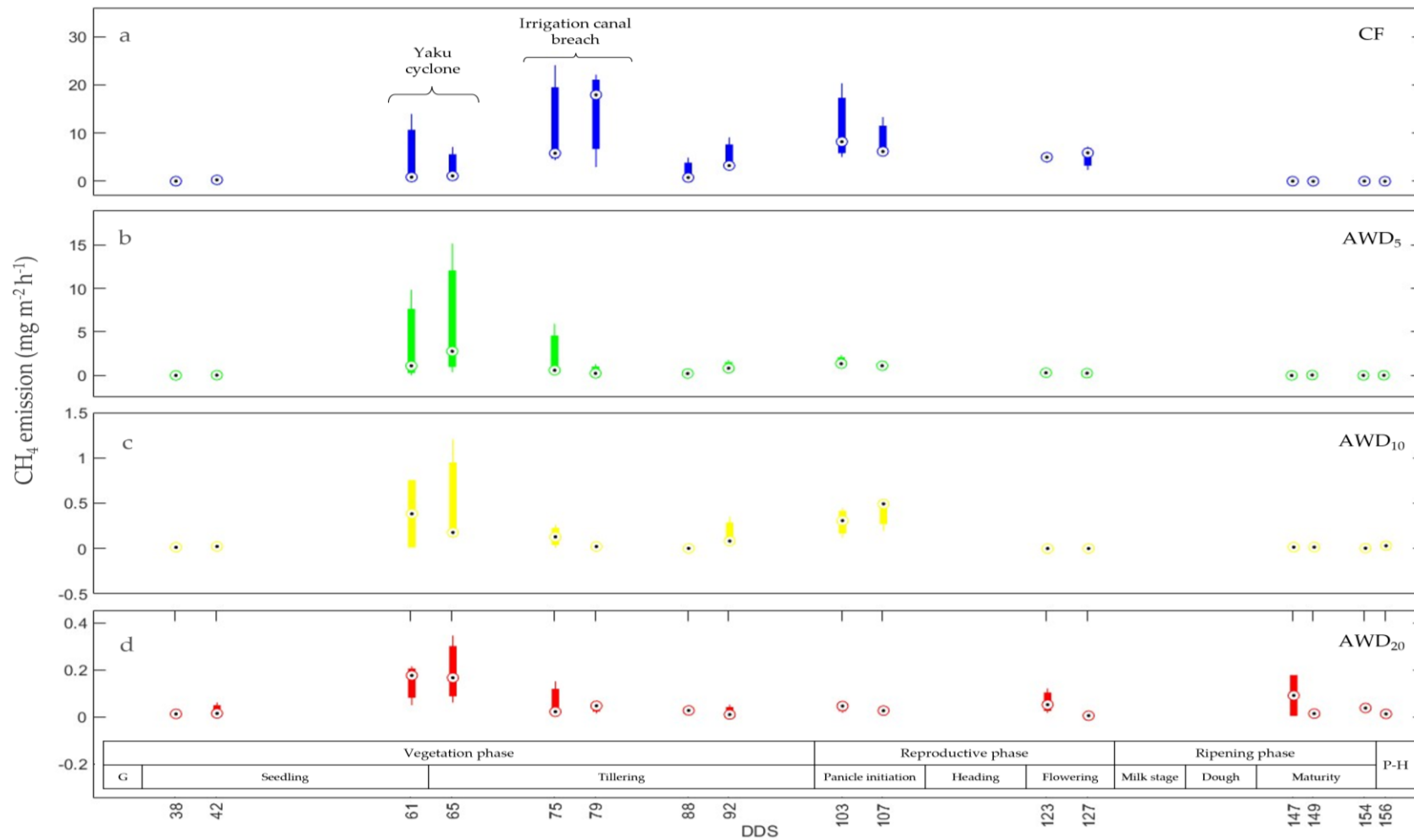


Figura 11. Diagrama Blox Plot de la Variación temporal del flujo de CH₄ ($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$) bajo régimen de riego CF (a), AWD₅ (b), AWD₁₀ (c) y AWD₂₀ (d).

De acuerdo con la fenología del cultivo las emisiones de CH₄ experimentan un aumento a medida que las plantas crecen hasta llegar a la etapa de floración. Este incremento se debe al desarrollo óptimo del tejido aerénquima, sobre todo en las primeras fases de desarrollo de la planta, lo que conlleva a una mayor liberación de exudados y a la fermentación de materia orgánica del suelo que es fácilmente degradable (Habib *et al.*, 2023). Por lo cual, los niveles máximos de emisiones se registraron durante la etapa vegetativa ($17,924 \pm 2,975 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en CF y $2,778 \pm 1,697 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en AWD) y en la etapa de reproducción ($8,214 \pm 2,249 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en CF y $1,353 \pm 0,795 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en AWD). Este incremento también se puede explicar por la degradación microbiana, la liberación de exudados de las raíces y el crecimiento de la biomasa microbiana durante la fase de máximo macollamiento (Ariani *et al.*, 2022). Estos resultados son consistentes con investigaciones previas (Habib *et al.*, 2023; K. Liang *et al.*, 2023; Sha *et al.*, 2022).

La disminución en las emisiones bajo el régimen CF inició durante la etapa de maduración ($0,002 \pm 0,001 - 0,025 \pm 0,012 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), el cual coincidió con el momento en que se suspende el riego. Esto podría explicarse por la mayor disponibilidad de oxígeno en la rizosfera, resultado de la aireación del suelo, lo cual promueve la oxidación de CH₄ por parte de las bacterias metanotróficas en las capas subterráneas del suelo y, como consecuencia, reduce las emisiones de CH₄ (Islam *et al.*, 2022).

A pesar de la disminución de las emisiones de CH₄ bajo el régimen CF, estas fueron mayores en casi todo el desarrollo del cultivo bajo el tratamiento AWD. Aunque existen diferencias en clima, tipo de suelo y otros factores, estudios previos también han presentado diferencias de emisiones cuando las compararon con el tratamiento CF, como se detalla en la Tabla 2. Esto se puede atribuir al hecho de que en los sistemas de cultivo de arroz, la transferencia y liberación de CH₄ hacia la atmósfera se llevan a cabo principalmente a través de tres mecanismos, siendo el más importante la difusión del gas disuelto en las interfases entre el agua y el aire, así como entre el suelo y el agua (Lakshani *et al.*, 2023). Dicho proceso de difusión se impulsa por la porosidad del suelo, que en nuestro caso es de textura franco arenosa. Esto restringe el tiempo disponible para que los metanótrofos degraden el CH₄ (Ariani *et al.*, 2022).

Las condiciones aireadas del tratamiento AWD, se vieron afectadas por fenómenos naturales como el “Ciclón Yaku”, que ocurrió al inicio del período de macollamiento lo que resultó

en un aumento de las emisiones (SENAMHI, 2023). Esto se debió a que el suelo se mantuvo saturado, generando condiciones anóxicas más prolongadas (Phungern *et al.*, 2023).

4.2.2. Dinámicas de las emisiones de N₂O

Se observó la variación temporal del N₂O en todo el periodo del experimento desde etapa de germinación hasta postcosecha (Figura 12). El incremento en la emisión durante la etapa de macollamiento máximo (75 y 79 DDS) bajo ambos regímenes de riego AWD y CF, corresponde a un periodo de seca extrema, con emisiones entre $0,011 \pm 0,008$ y $0,623 \pm 0,287 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Algunos valores altos se observaron después de la fertilización con urea, con emisiones entre $0,008 \pm 0,005$ y $0,379 \pm 0,196 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en el 42 DDS y entre $0,008 \pm 0,006$ y $0,211 \pm 0,216 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ en el 107 DDS, para el régimen de riego AWD.

Los picos más altos de emisión de N₂O se presentaron bajo el régimen AWD, $0,178 \pm 0,102$, $0,623 \pm 0,287$ y $0,379 \pm 0,196 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀, respectivamente en comparación con la emisión bajo CF que fue de $0,029 \pm 0,007 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Las emisiones de N₂O en los campos de arroz se ven directamente influenciadas por el régimen de riego AWD y la cantidad de fertilizantes que se utilizan. En la Figura 12 se observa que las tasas más altas de emisión de N₂O se producen cuando se usa el régimen de riego AWD₁₀ ($0,005 \pm 0,007 - 0,623 \pm 0,287 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), en comparación con las emisiones bajo régimen CF ($0,007 \pm 0,003 - 0,076 \pm 0,02 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

Tabla 8: Flujo de las emisiones de CH₄ y N₂O con riego continuamente inundado y tratamientos AWD.

Fecha	DDS	C-CH ₄ (mg m ⁻² h ⁻¹)				N-N ₂ O (mg m ⁻² h ⁻¹)			
		CF	AWD ₅	AWD ₁₀	AWD ₂₀	CF	AWD ₅	AWD ₁₀	AWD ₂₀
11/02/2023	38	0,025 ± 0,003	0,008 ± 0,021	0,013 ± 0,003	0,014 ± 0,009	0,007 ± 0,003	0,01 ± 0,007	0,027 ± 0,012	0,021 ± 0,012
15/02/2023	42	0,289 ± 0,405	0,033 ± 0,221	0,023 ± 0,011	0,016 ± 0,027	0,008 ± 0,005	0,043 ± 0,017	0,081 ± 0,034	0,379 ± 0,196
06/03/2023	61	0,857 ± 0,189	1,102 ± 0,771	0,384 ± 0,526	0,177 ± 0,086	0,016 ± 0,009	0,013 ± 0,003	0,034 ± 0,013	0,009 ± 0,007
10/03/2023	65	1,11 ± 0,343	2,778 ± 1,697	0,177 ± 0,614	0,167 ± 0,144	0,019 ± 0,013	0,017 ± 0,009	0,03 ± 0,018	0,028 ± 0,012
20/02/2023	75	5,816 ± 1,013	0,603 ± 0,233	0,129 ± 0,127	0,023 ± 0,082	0,011 ± 0,014	0,178 ± 0,102	0,623 ± 0,287	0,148 ± 0,107
24/03/2023	79	17,924 ± 2,975	0,242 ± 0,662	0,022 ± 0,012	0,048 ± 0,026	0,011 ± 0,008	0,131 ± 0,037	0,32 ± 0,257	0,059 ± 0,107
02/04/2023	88	0,769 ± 2,406	0,223 ± 0,168	0,002 ± 0,008	0,028 ± 0,008	0,029 ± 0,007	0,045 ± 0,026	0,04 ± 0,013	0,019 ± 0,007
06/04/2023	92	3,263 ± 0,286	0,831 ± 0,681	0,083 ± 0,157	0,011 ± 0,026	0,016 ± 0,009	0,01 ± 0,003	0,033 ± 0,009	0,041 ± 0,067
17/04/2023	103	8,214 ± 2,249	1,353 ± 0,795	0,307 ± 0,167	0,047 ± 0,019	0,019 ± 0,009	0,02 ± 0,008	0,019 ± 0,013	0,014 ± 0,008
21/04/2023	107	6,188 ± 0,475	1,122 ± 0,207	0,493 ± 0,189	0,028 ± 0,01	0,008 ± 0,006	0,028 ± 0,009	0,028 ± 0,016	0,211 ± 0,216
07/05/2023	123	4,996 ± 0,981	0,31 ± 0,073	0,102 ± 0,033	0,053 ± 0,053	0,018 ± 0,002	0,003 ± 0,002	0,02 ± 0,004	0,01 ± 0,004
11/05/2023	127	5,902 ± 2,524	0,263 ± 0,124	0,05 ± 0,04	0,006 ± 0,004	0,017 ± 0,013	0,013 ± 0,012	0,024 ± 0,014	0,007 ± 0,003
31/05/2023	147	0,02 ± 0,02	0,003 ± 0,001	0,015 ± 0,005	0,092 ± 0,123	0,076 ± 0,02	0,018 ± 0,002	0,026 ± 0,01	0,027 ± 0,005
02/06/2023	149	0,002 ± 0,001	0,042 ± 0,002	0,016 ± 0,013	0,015 ± 0,013	0,046 ± 0,009	0,046 ± 0,005	0,01 ± 0,004	0,024 ± 0,004
07/06/2023	154	0,025 ± 0,012	0,005 ± 0,006	0,004 ± 0,000	0,039 ± 0,000	0,027 ± 0,014	0,03 ± 0,011	0,005 ± 0,007	--
09/06/2023	156	0,006 ± 0,002	0,02 ± 0,014	0,031 ± 0,019	0,014 ± 0,002	0,05 ± 0,002	0,018 ± 0,014	0,025 ± 0,016	0,016 ± 0,004

Es importante resaltar que, en investigaciones recientes se han observado picos de emisiones más altos bajo el régimen AWD (Rajasekar & Selvi, 2022; Sha *et al.*, 2022), aunque la mayoría de ellos son menores que el valor máximo registrado en esta investigación ($0,623 \pm 0,287 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), como se detalla en la Tabla 2 (Gaihre *et al.*, 2023; Islam *et al.*, 2020, 2022). Esto podría deberse al uso de una cantidad elevada de fertilizantes nitrogenados (250 kg N ha^{-1}), que es la dosis convencional en esta zona de estudio, según lo reportado por los agricultores locales (White *et al.*, 2020). Es importante mencionar que dicha cantidad de nitrógeno supera la utilizada en investigaciones previas, como se muestra en la Tabla 2.

Sin embargo, la emisión de N_2O también se vio afectada por los largos períodos sin riego debido a la ruptura de un canal de distribución de agua entre los días 70 y 80 DDS. Esta interrupción tuvo un impacto principal en las emisiones bajo AWD ($0,178 \pm 0,102 - 0,623 \pm 0,287 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). A pesar de este cambio en las condiciones, las emisiones bajo CF no aumentaron significativamente, ya que el suelo estuvo encharcado durante un período prolongado, lo que resultó en una desnitrificación completa (Jiang *et al.*, 2019; Loiza *et al.*, 2024).

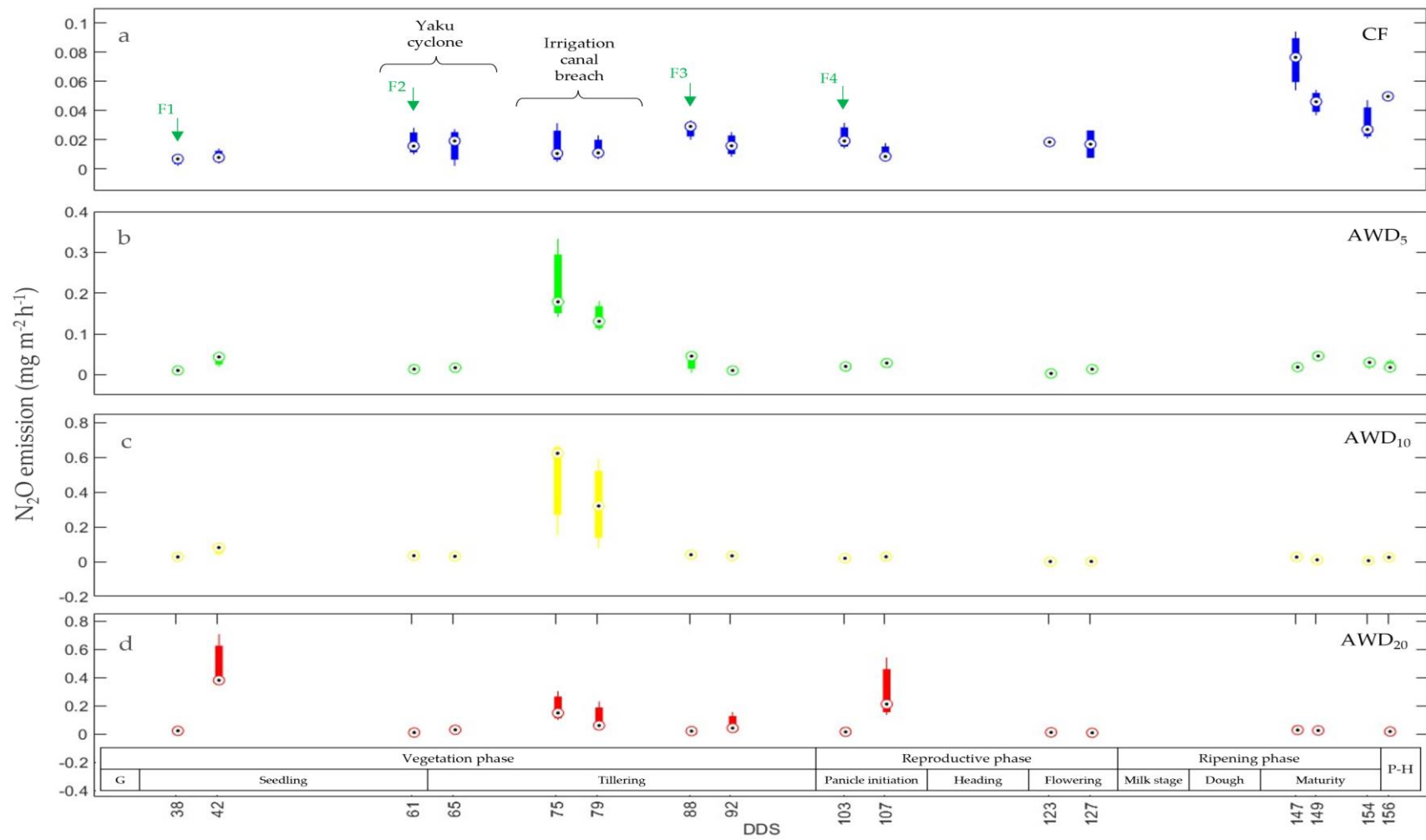


Figura 12. Diagrama Blox Plot de la Variación temporal del flujo de N_2O ($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$) bajo régimen de riego CF (a), AWD₅ (b), AWD₁₀ (c) y AWD₂₀ (d).

4.3. EMISIONES ACUMULADAS DE CH₄ Y N₂O

Los efectos en los regímenes de riego influenciaron de manera significativa ($p < 0,05$) a las emisiones acumuladas de GEI (Tabla 9). Para el CH₄, se observa diferencias significativas entre tratamientos. Los valores varían entre 1,59 $kg\ ha^{-1}$ para el régimen de riego AWD₂₀ hasta 108,55 $kg\ ha^{-1}$ bajo régimen CF. Las emisiones acumuladas de CH₄ fueron significativamente mayores bajo el régimen de riego CF. El régimen de riego AWD redujo las emisiones de CH₄, reduciendo en un 84, 96 y 99 por ciento en AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀, respectivamente.

Con respecto a la emisión acumulada de N₂O, también se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, con valores que variaron entre 0,63 $kg\ ha^{-1}$ para el régimen de riego CF hasta 2,36 $kg\ ha^{-1}$ bajo régimen AWD₁₀. Las emisiones acumuladas de N₂O fueron significativamente mayores bajo el régimen de riego AWD, incrementando en un 66, 273 y 255 por ciento en AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀, respectivamente. La Figura 13, muestra la significancia estadística entre los tratamientos, además de indicar la diferencia entre las medias de los grupos. En este contexto, la diferencia se calcula como la diferencia entre la media de la fila y la media de la columna.

a				b			
CH ₄	CF	AWD ₅	AWD ₁₀	N ₂ O	CF	AWD ₅	AWD ₁₀
AWD ₅	1,101			AWD ₅	-0,836		
AWD ₁₀	2,572	1,471		AWD ₁₀	-1,880	-1,044	
AWD ₂₀	3,086	1,984	0,512	AWD ₂₀	-0,892	0,987	-0,057

Figura 13. Prueba de Dunn entre tratamientos según la emisión de CH₄ (a) y N₂O (b). Los cuadros sombreados indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

La gestión del agua afecta las emisiones de CH₄ procedentes del cultivo de arroz. En este estudio, el riego AWD redujo de manera significativa ($p < 0,05$) las emisiones de CH₄ en comparación con la práctica convencional de los agricultores (Tabla 2). Estos resultados son respaldados con hallazgos anteriores (Tabla 2) (Islam *et al.*, 2020; K. Liang *et al.*, 2023), con reducciones del 99 por ciento en el tratamiento AWD₂₀. Esto debido a que la aireación intermitente hace que el ambiente del suelo sea óxico. Lo cual resulta en la oxidación del

CH₄ por parte de los metanótrofos, lo que provocó una caída en las emisiones de CH₄ (1,670 kg ha⁻¹ para AWD₂₀). Se ha informado que hasta el 80 por ciento del CH₄ producido durante la temporada de cultivo del arroz es oxidado por estos metanótrofos (Alauddin *et al.*, 2020; Phungern *et al.*, 2023). En contraste, el cultivo de arroz bajo el régimen CF crea un ambiente del suelo anaeróbico, es decir un ambiente reductor, lo que conduce a un bajo potencial redox (-150 mV). Este medio favorece la descomposición anaeróbica de sustancias orgánicas complejas por parte de los metanógenos CH₄ (Ariani *et al.*, 2022; Islam *et al.*, 2020).

En cuanto al rendimiento de los granos, el máximo se observó en el régimen CF (14,01 t ha⁻¹), lo que coincide con las emisiones máximas de CH₄ (140,963 kg ha⁻¹). Un mayor rendimiento, con un mayor desarrollo vegetativo y de raíces, puede aumentar el carbono disponible y mejorar la exudación de las raíces, sustrato utilizado por los metanógenos (Lakshani *et al.*, 2023; K. Liang *et al.*, 2023).

La gestión del agua también tuvo un impacto significativo en las emisiones acumuladas de N₂O (Tabla 9). En condiciones de CF, las emisiones de N₂O fueron mínimas (0,631 kg ha⁻¹). En cambio, las emisiones bajo el régimen AWD las emisiones fueron significativamente mayores, las más altas corresponden al tratamiento AWD₁₀ (2,354 kg ha⁻¹). La variación de los regímenes hídricos, pasando de CF a AWD, influyó en las tasas de nitrificación y desnitrificación, dependiendo de la disponibilidad de oxígeno. Durante el período de inundación, la nitrificación de los iones amonio (NH₄⁺) es baja, lo que inhibe la producción de N₂O (Islam *et al.*, 2022). En cambio, durante el ciclo de secado, la capa superior del suelo se vuelve inicialmente aeróbica, pero la capa inferior permanece anaeróbica, incluso si el nivel del agua se encuentra más de 15 cm por debajo de la superficie del suelo (Ariani *et al.*, 2022). Esto explica que a pesar de que el tratamiento AWD₂₀ tuviera el tiempo más prolongado de aireación (2,243 kg ha⁻¹) no superó a las emisiones acumuladas del tratamiento AWD₁₀ (2,354 kg ha⁻¹).

Tabla 9: Efecto de los regímenes de riego y sus niveles en el rendimiento del arroz, las emisiones de CH₄ y N₂O, el factor de emisión, GWP y YGWP.

Regímenes de riego	Rendimiento del grano (t ha ⁻¹)	Emisión de CH ₄ (kg ha ⁻¹)	EF de CH ₄ (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	Emisión de N ₂ O (kg ha ⁻¹)	EF de N ₂ O (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	GWP ^a	YGWP ^b
CF	14,01a	108,55a	0,92a	0,63a	0,01a	3211,54a	0,23a
AWD ₅	11,85b	17,72a	0,15a	1,05a	0,01a	782,11b	0,07b
AWD ₁₀	13,72c	4,02b	0,03b	2,36b	0,02b	755,58b	0,05c
AWD ₂₀	13,32c	1,59c	0,01c	2,24c	0,02b	656,46b	0,05c

Dentro de una columna, los resultados seguidos por letras comunes presentan diferencias significativas a un nivel de significancia del 95%, basado en los resultados de la prueba de Dunn.

a GWP (Potencial de calentamiento global; kg CO₂ equivalente ha⁻¹) de CH₄ y N₂O fue calculado usando valores de GWP de 28 y 265 para CH₄ and N₂O, respectivamente.

b YGWP (Potencial de Calentamiento Global relacionado con el rendimiento, CO₂ equivalente según el rendimiento) fue calculado dividiendo el potencial de calentamiento global con el rendimiento (kg ha⁻¹).

4.3.1. Rendimiento del grano, GWP, YGWP y factores de emisión

Los regímenes de riego influenciaron significativamente ($p < 0,05$) con el rendimiento, GWP y YGWP (ver Tabla 9). En todos los tratamientos AWD, se observó una reducción del GWP en comparación al régimen de riego CF. Los valores de GWP fueron de 782,11; 755,58 y 656,46 kg CO₂ equivalente ha⁻¹ para los regímenes AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀, respectivamente. Mientras que para el régimen CF los valores ascendieron a 3 211,54 kg CO₂ equivalente ha⁻¹. La disminución del GWP con respecto al régimen CF fue de 76, 77 y 80 por ciento, para los regímenes AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀, respectivamente. A pesar de que el aumento en las emisiones acumuladas de N₂O con el riego AWD representó un incremento del 100 por ciento en comparación con el riego CF, estas solo compensaron menos del 1 por ciento del GWP total. En general, el riego AWD redujo el GWP en un 77 por ciento en comparación con el riego CF, lo que confirma que las emisiones de CH₄ son el principal factor en el GWP total de los campos de arroz, superando el 90 por ciento del GWP total en este estudio. Las emisiones de CH₄ representaron el 94,78 por ciento en AWD y el 98,9 por ciento en CF, lo que concuerdan con resultados de investigaciones previas (K. Liang *et al.*, 2023; Liao *et al.*, 2023; Phungern *et al.*, 2023; Sha *et al.*, 2022). Sin embargo, algunos estudios indican que el principal contribuyente de GWP en el riego CF, corresponde al N₂O, debido a variaciones en el drenaje hasta capacidad de campo, al momento de la fertilización, elevando las emisiones de N₂O (Loaiza *et al.*, 2024). Por tanto, las medidas más efectivas para reducir el GWP y las emisiones de GEI en el cultivo de arroz deberían centrarse en la reducción de las emisiones de CH₄.

En cuanto al factor de emisión (EF) de CH₄ oscilo de 0,01 kg ha⁻¹ d⁻¹ para el régimen AWD₂₀, mientras que para el régimen CF se tuvo un valor de 0,92 kg ha⁻¹ d⁻¹, este último dentro del rango de valores presentados por el IPCC para Sudamérica (0,86 – 1,88 kg CH₄ ha⁻¹ d⁻¹) (IPCC, 2019). El FE medidos por el IPCC se basan en supuestos específicos, como la ausencia de enmiendas orgánicas en los campos y condiciones de aireación durante 180 días antes de la siembra. Sin embargo, estas condiciones no se aplican a nuestro estudio.

Por otro lado, el factor de emisión AWD para CH₄ varió entre 0,01 y 0,16, valores significativamente más bajos que los presentados por el IPCC (0,41 – 0,72 kg CH₄ ha⁻¹ d⁻¹), que corresponden al régimen hídrico con múltiples períodos de drenaje (IPCC, 2019). El IPCC (2019) también especifica que los campos de cultivo deben tener un período de ausencia de inundaciones. Sin embargo, en nuestro estudio, este período se vio interrumpido debido a las precipitaciones provocadas por la presencia del "cyclón Yaku", lo que pudo alterar los valores de humedad.

En relación con el rendimiento de los granos, se observó un descenso del 15, 2 y 5 por ciento, para los tratamientos AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀, respectivamente. Este descenso podría atribuirse al rápido drenaje del agua en el suelo franco arenoso, provocando estrés por sequía en las plantas, especialmente con las altas temperaturas de la zona (Loaiza *et al.*, 2024). Sin embargo, para el caso de AWD₁₀ solo se registró una disminución del 2 por ciento, lo que sugiere que el aumento en el intercambio de aire en el suelo con AWD puede proporcionar suficiente oxígeno al sistema radicular para facilitar la mineralización de la materia orgánica del suelo, mejorando así la fertilidad del suelo y el rendimiento del arroz, en contraposición al tratamiento AWD₅ (Oo *et al.*, 2018). En contraste, el máximo valor de rendimiento del grano se observa en el régimen CF (14.01 t ha⁻¹), lo que coincide con las emisiones máximas de CH₄ (140.963 kg ha⁻¹). Esto sugiere una relación entre el desarrollo vegetativo y radicular óptimo, el aumento del carbono disponible y la exudación de las raíces, que son sustrato para los metanógenos, lo que lleva a elevados rendimientos y emisiones de CH₄ (Lakshani *et al.*, 2023; K. Liang *et al.*, 2023).

Por otro lado, los valores de YGWP o la relación entre las emisiones totales de GEI y el rendimiento de grano, utilizado para medir la sostenibilidad de un sistema de gestión de arroz, los valores fueron de 0,066; 0,055 y 0,049 kg CO₂ equivalente kg⁻¹ para el régimen AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀ de forma respectiva, mientras que para el régimen CF se tuvo un

valor de 0,229 kg CO_2 equivalente kg^{-1} . El régimen AWD redujo los valores YGWP en un 71, 76 y 79 por ciento, para el régimen AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀, respectivamente en comparación con el riego CF (Islam *et al.*, 2020; Sha *et al.*, 2022). A pesar de que el régimen AWD₂₀ presentó el menor valor de YGWP (0,048), se considera que el régimen AWD₁₀ mitiga eficazmente el GWP ya que este solo reduce el 2 por ciento del rendimiento del grano. Aunque esta disminución en el rendimiento podría afectar al productor, dicha pérdida podría ser compensada con el aumento en la productividad del agua (Sudhir-Yadav, 2012). Además, ambos tratamientos no presentan diferencias significativas con respecto al YGWP. Lo que sugiere que el riego AWD tiene un efecto ambiental positivo al contribuir a una reducción en el uso de agua, así como ahorros adicionales de energía y reducción de emisiones de CO_2 , lo convierte en una estrategia de mitigación adecuada para los responsables de la toma de decisiones y los formuladores de políticas. Además, respalda el compromiso del estado con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, como se establece en la Ley Marco de Cambio Climático del país (2019).

V. CONCLUSIONES

1. Se obtuvieron las ecuaciones de correlación entre las cámaras opaca y transparente, para el flujo de CH₄ expresada como $Ln(fCH_{4,o}) = 1,3796 Ln(fCH_{4,t}) + 1,1293$ con un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0,823. Así mismo, se obtuvo la ecuación para el flujo de N₂O como $Ln(fN_2O_o) = 0,7723 Ln(fN_2O_t) - 0,9227$ con un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0,693. Estas relaciones fueron fundamentales para la validación de los resultados obtenidos en la zona de estudio.
2. El estudio cuantificó los flujos de emisiones de CH₄ y N₂O bajo diferentes manejos de riego, revelando que el riego AWD reduce significativamente las emisiones de CH₄, con emisiones promedio de 0,5586; 0,1158 y 0,0487 $mg\ m^{-2}\ h^{-1}$ para AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀, respectivamente, en comparación con el riego continuo, que mostró emisiones promedio de 3,4628 $mg\ m^{-2}\ h^{-1}$. Por otro lado, las emisiones de N₂O aumentaron bajo el riego AWD, con emisiones promedio de 0,0390; 0,0841 y 0,0675 $mg\ m^{-2}\ h^{-1}$ para AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀, respectivamente, en comparación con 0,0236 $mg\ m^{-2}\ h^{-1}$ bajo riego de inundación continua. Estos hallazgos subrayan la importancia de adoptar prácticas de riego intermitente para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas. Sin embargo, controlar la fertilización y los secados intermitentes podría alterar esta mitigación, incluso aumentando las emisiones.
3. Los resultados indicaron que el AWD reduce significativamente el GWP en comparación con el riego continuamente inundado, con reducciones de hasta 76, 77 y 80 por ciento, para los regímenes AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀, respectivamente. Este patrón también se reflejó en YGWP el cual mostró una correlación con el rendimiento de los granos, el régimen AWD redujo los valores YGWP en un 71, 76 y 79 por ciento, para el régimen AWD. Estos resultados resaltan la importancia de optimizar las prácticas de riego, no solo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también para mejorar la sostenibilidad de la producción agrícola.
4. Estos hallazgos resaltan la importancia de un enfoque más detallado y especializado en el tratamiento AWD₁₀, dado que reduce el GWP en un 77 por ciento, y solo afecta el

rendimiento del grano en un 2 por ciento. En consecuencia, los resultados de este estudio respaldan la adopción del riego AWD en la producción de arroz, al ser una práctica agrícola con bajas emisiones de gases de efecto invernadero y que garantiza un rendimiento adecuado de los granos. Esto contribuye a fortalecer la disponibilidad de arroz en la dieta de la población del norte del Perú y avanzar hacia una agricultura más sostenible y resiliente al cambio climático.

VI. RECOMENDACIONES

1. Desarrollar un protocolo para el monitoreo de gases de efecto invernadero de forma automatizada con el fin de mantener una presión de succión constante, lo que asegurará la coherencia de los resultados obtenidos en el laboratorio y contribuirá a la consistencia de los resultados de laboratorio.
2. Ampliar la recopilación de datos sobre fenología, incluyendo la altura de las plantas y la aplicación de índices de vegetación para obtener una comprensión más completa del entorno.
3. Incluir en investigaciones futuras una sección dedicada a la evaluación microbiológica del suelo, detallando las técnicas utilizadas y los resultados obtenidos.
4. Explorar el potencial redox del suelo para obtener una comprensión más profunda de los procesos microbiológicos y su impacto en el sistema estudiado.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Alauddin, M., Rashid Sarker, Md. A., Islam, Z., & Tisdell, C. (2020). Adoption of alternate wetting and drying (AWD) irrigation as a water-saving technology in Bangladesh: Economic and environmental considerations. *Land Use Policy*, *91*, 104430. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104430>
- Ariani, M., Hanudin, E., & Haryono, E. (2022). The effect of contrasting soil textures on the efficiency of alternate wetting-drying to reduce water use and global warming potential. *Agricultural Water Management*, *274*, 107970. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107970>
- Burba, G., & Anderson, D. (2010). *A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements: Principles and Workflow Examples for Scientific and Industrial Applications*. LI-COR Biosciences.
- Chauhan, B. S., Jabran, K., & Mahajan, G. (2017). *Rice Production Worldwide*. Springer.
- Cheng, H., Shu, K., Zhu, T., Wang, L., Liu, X., Cai, W., Qi, Z., & Feng, S. (2022a). Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield, water and nitrogen use, and greenhouse gas emissions in rice paddy fields. *Journal of Cleaner Production*, *349*, 131487. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131487>
- Cheng, H., Shu, K., Zhu, T., Wang, L., Liu, X., Cai, W., Qi, Z., & Feng, S. (2022b). Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield, water and nitrogen use, and greenhouse gas emissions in rice paddy fields. *Journal of Cleaner Production*, *349*, 131487. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131487>
- Chirinda, N., Arenas, L., Loaiza, S., Trujillo, C., Katto, M., Chaparro, P., Nuñez, J., Arango, J., Martinez-Baron, D., Loboguerrero, A., Becerra Lopez-Lavalle, L., Avila, I., Guzmán, M., Peters, M., Twyman, J., García, M., Serna, L., Escobar, D., Arora, D., ... Barahona, R. (2017). Novel Technological and Management Options for Accelerating Transformational Changes in Rice and Livestock Systems. *Sustainability*, *9*(11), 1891. <https://doi.org/10.3390/su9111891>

- Chua, T. (2020). *Desnitrificación del Suelo bajo dos tratamientos de Riego para estimar el Rendimiento y Emisión de Metano en Arroz* [Tesis de Pregrado]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Collier, S. M., Ruark, M. D., Oates, L. G., Jokela, W. E., & Dell, C. J. (2014). Measurement of Greenhouse Gas Flux from Agricultural Soils Using Static Chambers. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, 90, e52110. <https://doi.org/10.3791/52110>
- Datta, S. K. D. (1981). *Principles and Practices of Rice Production*. Int. Rice Res. Inst.
- Davidson, E. A., & Kanter, D. (2014). Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions. *Environmental Research Letters*, 9(10), 105012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105012>
- de Bont, J. A. M., Lee, K. K., & Bouldin, D. F. (1978). Bacterial Oxidation of Methane in a Rice Paddy. *Ecological Bulletins*, 26, 91-96.
- Della Lunga, D., Brye, K. R., Slayden, J. M., & Henry, C. G. (2023). Evaluation of site position and tillage effects on global warming potential from furrow-irrigated rice in the mid-southern USA. *Geoderma Regional*, 32, e00625. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00625>
- Dey, S., Ram, K., Chhabra, A. K., Reddy, A. L., & Janghel, D. K. (2018). Aerobic Rice: Smart Technology of Rice Cultivation. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(08), 1799.
- Elder, J. W., & Lal, R. (2008). Tillage effects on gaseous emissions from an intensively farmed organic soil in North Central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 98(1), 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.003>
- Frisancho, G. (2020). *Efecto del Riego por Inundación y Secas en la Emisión de Gases en el Cultivo de Arroz (oryza sativa l.)*, UNALM [Tesis de Pregrado]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Gaihre, Y. K., Bible, W. D., Singh, U., Sanabria, J., & Baral, K. R. (2023). Mitigation of Nitrous Oxide Emissions from Rice–Wheat Cropping Systems with Sub-Surface Application of Nitrogen Fertilizer and Water-Saving Irrigation. *Sustainability*, 15(9), 7530. <https://doi.org/10.3390/su15097530>
- Habib, M. A., Islam, S. M. M., Haque, Md. A., Hassan, L., Ali, Md. Z., Nayak, S., Dar, M. H., & Gaihre, Y. K. (2023). Effects of Irrigation Regimes and Rice Varieties on

- Methane Emissions and Yield of Dry Season Rice in Bangladesh. *Soil Systems*, 7(2), 41. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020041>
- Heros, E. C. (2012). *Manual Técnico de Manejo Integrado del Arroz*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Hu, M., Wade, A. J., Shen, W., Zhong, Z., Qiu, C., & Lin, X. (2023). Effects of organic fertilizers produced by different production processes on nitrous oxide and methane emissions from double-cropped rice fields. *Pedosphere*, S1002016023000255. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.03.006>
- IAEA. (1992). *Manual on Measurement of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agriculture*. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. <https://www.iaea.org/publications/936/manual-on-measurement-of-methane-and-nitrous-oxide-emissions-from-agriculture>
- IPCC. (2014). *III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I*. 151. Scopus.
- IPCC. (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 5 Cropland*. 4.
- IPCC. (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*.
- Islam, S. M. M., Gaihre, Y. K., Islam, Md. R., Ahmed, Md. N., Akter, M., Singh, U., & Sander, B. O. (2022). Mitigating greenhouse gas emissions from irrigated rice cultivation through improved fertilizer and water management. *Journal of Environmental Management*, 307, 114520. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114520>
- Islam, S. M. M., Gaihre, Y. K., Islam, Md. R., Akter, M., Al Mahmud, A., Singh, U., & Sander, B. O. (2020). Effects of water management on greenhouse gas emissions from farmers' rice fields in Bangladesh. *Science of The Total Environment*, 734, 139382. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139382>
- Jiang, Y., Carrijo, D., Huang, S., Chen, J., Balaine, N., Zhang, W., Van Groenigen, K. J., & Linnquist, B. (2019). Water management to mitigate the global warming potential of

- rice systems: A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 234, 47-54.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.010>
- Kahani, F., & Hittalmani, S. (2015). *Genetic Analysis and Traits Association in F2 Intervarietal Populations in Rice Under Aerobic Condition*.
<https://doi.org/10.4172/2375-4338.1000152>
- Khaliq, M. A., Khan Tarin, M. W., Jingxia, G., Yanhui, C., & Guo, W. (2019a). Soil liming effects on CH₄, N₂O emission and Cd, Pb accumulation in upland and paddy rice. *Environmental Pollution*, 248, 408-420.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.036>
- Khaliq, M. A., Khan Tarin, M. W., Jingxia, G., Yanhui, C., & Guo, W. (2019b). Soil liming effects on CH₄, N₂O emission and Cd, Pb accumulation in upland and paddy rice. *Environmental Pollution*, 248, 408-420.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.036>
- Lakshani, M. M. T., Deepagoda, T. K. K. C., Li, Y., Hansen, H. F. E., Elberling, B., Nissanka, S. P., Senanayake, D. M. J. B., Hamamoto, S., Babu, G. L. S., Chanakya, H. N., G., P. T., Arunkumar, P. G., Sander, B. O., Clough, T. J., & Smits, K. (2023). Impact of Water Management on Methane Emission Dynamics in Sri Lankan Paddy Ecosystems. *Water*, 15(21), 3715. <https://doi.org/10.3390/w15213715>
- Liang, H., Xu, J., Hou, H., Qi, Z., Yang, S., Li, Y., & Hu, K. (2022). Modeling CH₄ and N₂O emissions for continuous and noncontinuous flooding rice systems. *Agricultural Systems*, 203, 103528. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103528>
- Liang, K., Zhong, X., Fu, Y., Hu, X., Li, M., Pan, J., Liu, Y., Hu, R., & Ye, Q. (2023). Mitigation of environmental N pollution and greenhouse gas emission from double rice cropping system with a new alternate wetting and drying irrigation regime coupled with optimized N fertilization in South China. *Agricultural Water Management*, 282, 108282. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108282>
- Liao, B., Cai, T., Wu, X., Luo, Y., Liao, P., Zhang, B., Zhang, Y., Wei, G., Hu, R., Luo, Y., & Cui, Y. (2023). A combination of organic fertilizers partially substitution with alternate wet and dry irrigation could further reduce greenhouse gases emission in rice field. *Journal of Environmental Management*, 344, 118372. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118372>

- Liu, L., Ouyang, W., Liu, H., Zhu, J., Ma, Y., Wu, Q., Chen, J., & Zhang, D. (2021). Potential of paddy drainage optimization to water and food security in China. *Resources, Conservation and Recycling*, *171*, 105624. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105624>
- Liu, N., Liu, F., Sun, Z., Wang, Z., & Yang, L. (2023). Nitrogen addition changes the canopy biological characteristics of dominant tree species in an evergreen broad-leaved forest. *Science of The Total Environment*, *902*, 165914. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165914>
- Loaiza, S., Verchot, L., Valencia, D., Guzmán, P., Amezcuita, N., Garcés, G., Puentes, O., Trujillo, C., Chirinda, N., & Pittelkow, C. M. (2024). Evaluating greenhouse gas mitigation through alternate wetting and drying irrigation in Colombian rice production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *360*, 108787. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108787>
- Lombardi, B., Loaiza, S., Trujillo, C., Arevalo, A., Vázquez, E., Arango, J., & Chirinda, N. (2022). Greenhouse gas emissions from cattle dung depositions in two Urochloa forage fields with contrasting biological nitrification inhibition (BNI) capacity. *Geoderma*, *406*, 115516. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115516>
- Luan, J., & Wu, J. (2014). Gross photosynthesis explains the ‘artificial bias’ of methane fluxes by static chamber (opaque versus transparent) at the hummocks in a boreal peatland. *Environmental Research Letters*, *9*(10), 105005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105005>
- Mallareddy, M., Thirumalaikumar, R., Balasubramanian, P., Naseeruddin, R., Nithya, N., Mariadoss, A., Eazhilkrishna, N., Choudhary, A. K., Deiveegan, M., Subramanian, E., Padmaja, B., & Vijayakumar, S. (2023). Maximizing Water Use Efficiency in Rice Farming: A Comprehensive Review of Innovative Irrigation Management Technologies. *Water*, *15*(10), 1802. <https://doi.org/10.3390/w15101802>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (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*(1), 2391.
- Matsuda, S., Nakamura, K., Hung, T., Quang, L. X., Horino, H., Hai, P. T., Ha, N. D., & Hama, T. (2022). Paddy ponding water management to reduce methane emission

- based on observations of methane fluxes and soil redox potential in the Red River Delta, Vietnam *. *Irrigation and Drainage*, 71(1), 241-254. <https://doi.org/10.1002/ird.2645>
- Minamikawa, K., Tokida, T., Sudo, S., Padre, A., & Yagi, K. (2015). Guidelines for measuring CH₄ and N₂O emissions from rice paddies by a manually operated closed chamber method. *National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Japan*, 76.
- Montgomery, D. (1991). *Diseño y análisis de experimentos*. Grupo editorial Iberoamérica.
- Neue, H.-U., & Roger, P. A. (1993). Rice Agriculture: Factors Controlling Emissions. En M. A. K. Khalil (Ed.), *Atmospheric Methane: Sources, Sinks, and Role in Global Change* (pp. 254-298). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84605-2_13
- Oo, A. Z., Sudo, S., Inubushi, K., Chellappan, U., Yamamoto, A., Ono, K., Mano, M., Hayashida, S., Koothan, V., Osawa, T., Terao, Y., Palanisamy, J., Palanisamy, E., & Venkatachalam, R. (2018). Mitigation Potential and Yield-Scaled Global Warming Potential of Early-Season Drainage from a Rice Paddy in Tamil Nadu, India. *Agronomy*, 8(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy8100202>
- Park, J.-R., Jang, Y.-H., Kim, E.-G., Lee, G.-S., & Kim, K.-M. (2023). Nitrogen Fertilization Causes Changes in Agricultural Characteristics and Gas Emissions in Rice Field. *Sustainability*, 15(4), 3336. <https://doi.org/10.3390/su15043336>
- Phungern, S., Azizan, S. N. F., Yusof, N. B., & Noborio, K. (2023). Effects of Water Management and Rice Varieties on Greenhouse Gas Emissions in Central Japan. *Soil Systems*, 7(4), 89. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040089>
- Porras-Jorge, R., Ramos-Fernández, L., Ojeda-Bustamante, W., & Ontiveros-Capurata, R. (2020). Performance assessment of the AquaCrop model to estimate rice yields under alternate wetting and drying irrigation in the coast of Peru. *Scientia agropecuaria*, 11(3), 309-321. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.03>
- 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. <https://doi.org/10.3390/s22114141>
- Reavis, C. W., Suvočarev, K., Reba, M. L., & Runkle, B. R. K. (2021). Impacts of alternate wetting and drying and delayed flood rice irrigation on growing season

- evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 596, 126080. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126080>
- Sander, B. O., Samson, M., & Buresh, R. J. (2014). Methane and nitrous oxide emissions from flooded rice fields as affected by water and straw management between rice crops. *Geoderma*, 235-236, 355-362. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.020>
- SENAMHI. (2023). *Boletín climático nacional (marzo 2023)*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/2776>
- Sha, Y., Chi, D., Chen, T., Wang, S., Zhao, Q., Li, Y., Sun, Y., Chen, J., & Lærke, P. E. (2022). Zeolite application increases grain yield and mitigates greenhouse gas emissions under alternate wetting and drying rice system. *Science of The Total Environment*, 838, 156067. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156067>
- Song, T., Yang, F., Das, D., Chen, M., Hu, Q., Tian, Y., Cheng, C., Liu, Y., & Zhang, J. (2020). Transcriptomic analysis of photosynthesis-related genes regulated by alternate wetting and drying irrigation in flag leaves of rice. *Food and Energy Security*, 9(3), e221. <https://doi.org/10.1002/fes3.221>
- Sudhir-Yadav, E., Humphreys, T., Tao Li, Gill, G., & Kukal, S. S. (2012). Evaluation of tradeoffs in land and water productivity of dry seeded rice as affected by irrigation schedule. *Field Crops Research*, 128, 180-190. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.01.005>.
- Tian, H., Chen, G., Lu, C., Xu, X., Ren, W., Zhang, B., Banger, K., Tao, B., Pan, S., Liu, M., Zhang, C., Bruhwiler, L., & Wofsy, S. (2015). Global methane and nitrous oxide emissions from terrestrial ecosystems due to multiple environmental changes. *Ecosystem Health and Sustainability*, 1(1), 1-20. <https://doi.org/10.1890/EHS14-0015.1>
- van den Heuvel, R. N., Hefting, M. M., Tan, N. C. G., Jetten, M. S. M., & Verhoeven, J. T. A. (2009). N₂O emission hotspots at different spatial scales and governing factors for small scale hotspots. *Science of The Total Environment*, 407(7), 2325-2332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.010>
- Van Dung, T., Thu Nguyen, K., Ho, N. H. P., Lich Duong, N. T., Vu, N. M. T., Nguyen, T.

- P. L., Van, L. V., & MacDonald, B. (2023). Reducing greenhouse gas emission by alternation of the upland crop rotation in the Mekong Delta, Vietnam. *Soil and Water Research*, 18(1), 16-24. <https://doi.org/10.17221/44/2022-SWR>
- Wang, A., Ma, X., Xu, J., & Lu, W. (2019). Methane and nitrous oxide emissions in rice-crab culture systems of northeast China. *Aquaculture and Fisheries*, 4(4), 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2018.12.006>
- White, M., Heros, E., Graterol, E., Chirinda, N., & Pittelkow, C. M. (2020). Balancing Economic and Environmental Performance for Small-Scale Rice Farmers in Peru. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 564418. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.564418>
- Xu, Q., Dai, L., Shang, Z., Zhou, Y., Li, J., Dou, Z., Yuan, X., & Gao, H. (2023). Application of controlled-release urea to maintain rice yield and mitigate greenhouse gas emissions of rice–crayfish coculture field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 344, 108312. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108312>
- Yu, K., Xiao, S., Zheng, F., Fang, X., Zou, J., & Liu, S. (2023). A greater source of methane from drainage rivers than from rice paddies with drainage practices in southeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 345, 108321. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108321>
- Zhao, J., Chen, X., & Bao, A. M. (2014). Spatial representativeness of eddy covariance measurements using footprint analysis in arid areas. *Environmental Earth Sciences*, 71(4), 1691-1697. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2573-y>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: PANEL FOTOGRÁFICO



Llegada de bidones



Corte de tapas de bidones



Corte de tapas de bidones



Corte de orificios para bidones



Corte de orificios para bidones



Pintado de cámaras

Continuación ...



Cámaras opacas pintadas



Ensamblado de cabinas de polipropileno (base y cuerpo)



Construcción de techo protector para las cámaras



Techo protector de cámaras



Instalación de la base de la cámara transparente (05/12/22)



Instalación de la base de la cámara opaca (05/12/22)

Figura 14. Construcción de cámaras



Monitoreo de GEI (11/02/231)



Estación meteorológica Atmos41 –
Monitoreo 24h



Extracción de gas (06/03/23)



Estación meteorológica Atmos41 (06/03/23)



Monitores para extracción de gases
(06/03/23)



Monitoreo tratamiento AWD₁₀ (06/03/23)

Continuación ...



Parcela con régimen CF (10/03/23)



Instalación de estación meteorológica Atmos41 (10/03/23)



Extracción de gases (31/05/23)



Medición de parámetros de suelo (31/05/23)



Construcción de techo protector para las cámaras



Equipo de trabajo para el desarrollo del proyecto (02/06/23)

Figura 15. Desarrollo de la fase experimental en parcelas de la EEA Vista Florida - INIA, Lambayeque.

Anexo 2: ANÁLISIS DE SUELO Y AGUA DE RIEGO

INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : PROYECTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO - PROYECTO GE
PROCEDENCIA : LAMBAYEQUE/ CHICLAYO/ PICSII/ INIA VISTA FLORIDA -
PROYECTO PRO CIENCIAS
REFERENCIA : H.R. 78884
FACTURA : 9397
FECHA : 16/02/2023

Número Muestra		N	N	N	C	S
Lab	Claves	total	nitró	amoniaco	orgánico	disponible
		%	ppm	ppm	%	ppm
679		0.11	14.01	29.40	0.71	3.76

Número Muestra		Pb	Cd	Cr
Lab	Claves	total	total	total
		ppm	ppm	ppm
679		14.82	1.92	13.50

Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

ANÁLISIS DE SUELOS : SALINIDAD

Procedencia

Departamento : LAMBAYEQUE

Distrito : PICSÍ

Provincia: PISCO

Predio : INIA VISTA FLORIDA -

PROYECTO PRO CIENCIAS

Referencia : H.R. 78884-015S-23

Solicitante: PROYECTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO -
PROYECTO GEI

Factura : 9397

Número de Muestra		C.E.	Análisis Mecánico				pH 1:1	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	
Lab.	Campo	dS/m 1:1	Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺			Al ³⁺ + H ⁺
												meq/100g							
679		0.42	26	39	35	Fr.Ar.	7.64	4.02	1.22	12.0	376	22.08	18.05	2.81	0.97	0.25	0.00	22.08	22.08

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

No Muest. Lab	Saturación %	pH Pasta Sat.	C.E. Ext.St. dS/m	Cationes Solubles (meq/L)					Aniones Solubles (meq/L)					Boro Soluble ppm	Yeso Soluble %	PSI	
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SUMA	NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻				SUMA
679	34	7.21	0.89	6.75	0.91	0.28	1.39	9.33	0.42	0.00	3.52	2.63	2.70	9.26	0.42	0.01	1.14

La Molina, 16 de Febrero del 2023

Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe de Laboratorio

ANALISIS DE AGUA

SOLICITANTE : PROYECTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO - PROYECTO GEI

PROCEDENCIA : LAMBAYEQUE/ CHICLAYO/ PICS/ INIA VISTA ALEGRE

REFERENCIA : H.R. 78982

FACTURA : 9397

No. Laboratorio	041	
No. Campo		
pH		7.34
C.E. dS/m		0.31
Calcio meq/L		1.91
Magnesio meq/L		0.43
Potasio meq/L		0.10
Sodio meq/L		0.59
SUMA DE CATIONES		3.03
Nitratos meq/L		0.00
Carbonatos meq/L		0.00
Bicarbonatos meq/L		1.89
Sulfatos meq/L		0.29
Cloruros meq/L		1.00
SUMA DE ANIONES		3.18
Sodio %		19.45
RAS		0.55
Boro ppm		N.D.
Clasificación		C2-S1
Dureza total ppm		113.560
Alcalinidad ppm		115.290
Fosfato ppm		1.140
Hierro ppm		N.D.
Plomo ppm		N.D.
Cadmio ppm		N.D.
Cromo ppm		N.D.

L.D. límite de detección.

L.C. límite de cuantificación.

N.D. no detectable.

Boro: LD = 0.1462 ppm / LC = 0.4531 ppm

Hierro: LD = 0.0601 ppm / LC = 0.1820 ppm

Plomo: LD = 0.0067 ppm / LC = 0.0204 ppm

Cadmio: LD = 0.0035 ppm / LC = 0.0107 ppm

Cromo: LD = 0.0027 ppm / LC = 0.0082 ppm

La Molina, 01 de Marzo del 2025

Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe de Laboratorio

Anexo 3: ANÁLISIS DE GEI EN CIAT – COLOMBIA

Resultados de la solicitud de análisis A2023-76



Laboratorio de gases de efecto invernadero

Solicitante: Ida Echegaray

Numero serial: A2023-76

Numero de muestras: 98

Procedencia: Universidad Nacional La Molina

Fecha de muestreo: 17-Apr-2023

Fecha entrega de muestras: 02-May-2023

Fecha de solicitud: 02-May-2023

Entrega de resultados: 24-May-2023

Información proyecto:

Observaciones: Fechas de muestreo: 2023/04/17, 2023/04/21.

Equipo: GC-2014 # 0597

#	Descripcion	CH4 (ppm)	CO2 (ppm)	N2O (ppm)
1	Amb 17_04_23	2.46	785	0.322
2	1T0_t0 17_04_23	5.12	602	0.318
3	1T0_t20 17_04_23	5.45	703	0.310
4	1T0_t40 17_04_23	7.00	880	0.344
5	1T0_t60 17_04_23	8.31	1014	0.324
6	2T0_t0 17_04_23	5.06	486	0.314
7	2T0_t20 17_04_23	5.74	694	0.323
8	2T0_t40 17_04_23	7.72	896	0.335
9	2T0_t60 17_04_23	9.69	1066	0.334
10	3T0_t0 17_04_23	9.76	478	0.317
11	3T0_t20 17_04_23	12.8	685	0.330
12	3T0_t40 17_04_23	15.3	901	0.306
13	3T0_t60 17_04_23	19.1	1118	0.302
14	1T1_t0 17_04_23	2.33	468	0.323
15	1T1_t20 17_04_23	2.97	559	0.339
16	1T1_t40 17_04_23	3.62	620	0.340
17	1T1_t60 17_04_23	4.32	690	0.325
18	2T1_t0 17_04_23	2.40	504	0.332
19	2T1_t20 17_04_23	2.85	857	0.334
20	2T1_t40 17_04_23	3.28	1234	0.331
21	2T1_t60 17_04_23	3.75	1634	0.330
22	3T1_t0 17_04_23	2.51	472	0.333
23	3T1_t20 17_04_23	2.73	578	0.313
24	3T1_t40 17_04_23	3.11	782	0.321
25	3T1_t60 17_04_23	3.37	934	0.330
26	1T2_t0 17_04_23	2.39	512	0.308
27	1T2_t20 17_04_23	2.44	825	0.324
28	1T2_t40 17_04_23	2.58	1097	0.339
29	1T2_t60 17_04_23	2.61	1487	0.321
30	2T2_t0 17_04_23	2.39	494	0.320
31	2T2_t20 17_04_23	2.62	568	0.328
32	2T2_t40 17_04_23	2.83	620	0.325
33	2T2_t60 17_04_23	3.01	747	0.302
34	3T2_t0 17_04_23	2.38	447	0.324
35	3T2_t20 17_04_23	2.54	437	0.310
36	3T2_t40 17_04_23	2.69	525	0.319
37	3T2_t60 17_04_23	2.85	614	0.317
38	1T3_t0 17_04_23	2.26	447	0.318
39	1T3_t20 17_04_23	2.41	649	0.322
40	1T3_t40 17_04_23	2.38	840	0.324
41	1T3_t60 17_04_23	2.44	1109	0.327
42	2T3_t0 17_04_23	2.27	451	0.324
43	2T3_t20 17_04_23	2.27	672	0.325
44	2T3_t40 17_04_23	2.35	993	0.311
45	2T3_t60 17_04_23	2.39	1370	0.321

Laboratorio de gases de efecto invernadero
Tel. 445-01-00

Centro Internacional de Agricultura Tropical. Todos los derechos reservados.
Km. 17 recta Cali-Palmira

Prohibida su modificación total o parcial

Continuación ...

Resultados de la solicitud de análisis A2023-76

#	Descripcion	CH4 (ppm)	CO2 (ppm)	N2O (ppm)
46	3T3_t0_17_04_23	2.27	393	0.330
47	3T3_t20_17_04_23	2.32	629	0.318
48	3T3_t40_17_04_23	2.30	900	0.332
49	3T3_t60_17_04_23	2.35	1209	0.328
50	Amb_21_04_23	2.34	417	0.314
51	1T0_t0_21_04_23	5.79	557	0.349
52	1T0_t20_21_04_23	7.13	685	0.312
53	1T0_t40_21_04_23	7.03	704	0.351
54	1T0_t60_21_04_23	9.75	863	0.357
55	2T0_t0_21_04_23	4.32	536	0.335
56	2T0_t20_21_04_23	5.78	726	0.345
57	2T0_t40_21_04_23	6.48	840	0.354
58	2T0_t60_21_04_23	8.34	1062	0.338
59	3T0_t0_21_04_23	4.31	544	0.328
60	3T0_t20_21_04_23	5.69	631	0.338
61	3T0_t40_21_04_23	8.17	824	0.326
62	3T0_t60_21_04_23	10.9	966	0.341
63	1T1_t0_21_04_23	2.67	494	0.337
64	1T1_t20_21_04_23	3.06	551	0.326
65	1T1_t40_21_04_23	3.45	616	0.381
66	1T1_t60_21_04_23	3.83	659	0.366
67	2T1_t0_21_04_23	2.58	558	0.326
68	2T1_t20_21_04_23	3.10	776	0.340
69	2T1_t40_21_04_23	3.54	1067	0.340
70	2T1_t60_21_04_23	3.90	1377	0.344
71	3T1_t0_21_04_23	2.62	593	0.311
72	3T1_t20_21_04_23	2.93	629	0.317
73	3T1_t40_21_04_23	3.30	801	0.355
74	3T1_t60_21_04_23	3.63	982	0.338
75	1T2_t0_21_04_23	2.59	658	0.332
76	1T2_t20_21_04_23	2.57	870	0.362
77	1T2_t40_21_04_23	2.68	1363	0.354
78	1T2_t60_21_04_23	2.79	1472	0.371
79	2T2_t0_21_04_23	2.53	502	0.337
80	2T2_t20_21_04_23	2.75	634	0.321
81	2T2_t40_21_04_23	2.97	654	0.357
82	2T2_t60_21_04_23	3.23	774	0.341
83	3T2_t0_21_04_23	2.61	496	0.339
84	3T2_t20_21_04_23	2.79	508	0.354
85	3T2_t40_21_04_23	3.05	596	0.313
86	3T2_t60_21_04_23	3.24	663	0.339
87	1T3_t0_21_04_23	2.48	590	0.362
88	1T3_t20_21_04_23	2.48	806	0.446
89	1T3_t40_21_04_23	2.53	1079	0.558
90	1T3_t60_21_04_23	2.48	1409	0.605
91	2T3_t0_21_04_23	2.50	525	0.452
92	2T3_t20_21_04_23	2.48	918	1.05
93	2T3_t40_21_04_23	2.54	1277	1.44
94	2T3_t60_21_04_23	2.58	1686	2.03
95	3T3_t0_21_04_23	2.50	528	0.429
96	3T3_t20_21_04_23	2.49	781	0.542
97	3T3_t40_21_04_23	2.49	1062	0.732
98	3T3_t60_21_04_23	2.49	1381	0.873

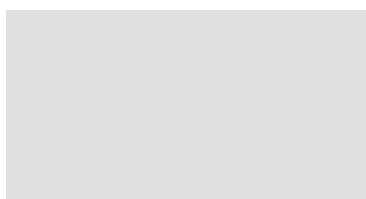
Notas:1. Los resultados presentes en este informe, se refieren unicamente a las muestras analizadas.
2. Este informe solo debe ser reproducido en forma total y con el visto bueno del Laboratorio.

Continuación ...

Resultados de la solicitud de análisis A2023-76

Estandares usados

Descripción	Área Metano	Área Dioxido de carbono	Área Oxido nitroso
Estandar 1 492 ppm 20230510	33827	5640158	5775
Estandar 2 492 ppm 20230510	35547	5376873	6287
Promedio	34687	5508516	6031
Desviación	1216	186171	362
CV	3.51	3.38	6.00
Estandar 3 991 ppm 20230510	60299	7755744	9088
Estandar 4 991 ppm 20230510	63426	7816569	9401
Promedio	61862	7786156	9244
Desviación	2211	43010	221
CV	3.57	0.552	2.39



Determinación	Método	Limite Detección del Equipo (LD)
CH4 (ppm)	Metano	0.493
CO2 (ppm)	Dioxido de carbono	87.8
N2O (ppm)	Oxido nitroso	0.165

Anexo 4: VOLUMENES DE RIEGO

Fase	Fecha	DDS	CF		AWD ₅		AWD ₁₀		AWD ₂₀	
			Volumen (3)	mm	Volumen (3)	mm	Volumen (3)	mm	Volumen (3)	mm
Vegetativa	3/2/2023	30	1211,04	121	926,53	93	916,71	92	914,56	91
	6/2/2023	33	1140,36	114	864,20	86	827,22	83	880,91	88
	8/2/2023	35	1070,00	107	0,00	0	0,00	0	0,00	0
	11/2/2023	38	1070,00	107	939,90	94	874,17	87	865,79	87
	13/2/2023	40	700,00	70	0,00	0	0,00	0	0,00	0
	15/2/2023	42	720,23	72	619,83	62	548,48	55	612,91	61
	16/2/2023	43	636,36	64	566,29	57	628,81	63	586,97	59
	18/2/2023	45	1280,00	128	578,25	58	558,07	56	527,68	53
	20/2/2023	47	578,26	58	536,55	54	492,90	49	499,40	50
	24/2/2023	51	1157,12	116	880,18	88	820,75	82	824,03	82
	28/2/2023	55	570,00	57	0,00	0	406,18	41	0,00	0
	1/3/2023	56	577,03	58	0,00	0	355,13	36	0,00	0
	4/3/2023	59	683,87	68	670,19	67	632,61	63	646,75	65
	8/3/2023	63	1020,00	102	618,64	62	584,68	58	522,91	52
	12/3/2023	67	563,23	56	562,05	56	503,58	50	525,14	53
	13/3/2023	68	690,00	69	620,00	62	600,00	60	550,00	55
	15/3/2023	70	400,00	40	450,00	45	420,00	42	410,00	41
	31/3/2023	86	852,32	85	804,20	80	731,99	73	737,56	74
	6/4/2023	92	750,00	75	667,50	67	679,14	68	637,03	64
Reproductiva	12/4/2023	98	560,00	56	502,99	50	488,34	49	473,24	47
	18/4/2023	104	582,73	58	557,59	56	426,42	43	413,54	41
	24/4/2023	110	620,74	62	605,97	61	526,80	53	562,49	56
	30/4/2023	116	560,00	56	593,75	59	469,86	47	799,55	80
	4/5/2023	120	556,93	56	502,99	50	488,34	49	799,55	80
Maduración	8/5/2023	124	521,30	52	523,68	52	470,32	47	751,24	75
	12/5/2023	128	899,65	90	877,28	88	817,59	82	799,55	80
			19971,17	1997	14468,56	1447	14268,09	1472	14340,80	1434