

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“DISEÑO DE PROTOTIPO MULTISENSOR ECONÓMICO
BASADO EN ARDUINO PARA MONITOREO DE GEI
EN ECOSISTEMAS DE ARROZALES”**

Presentada por:

MIRKO WILLIAMS BONILLA CORDOVA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Lima – Perú

2024

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

“DISEÑO DE PROTOTIPO MULTISENSOR ECONÓMICO BASADO EN ARDUINO PARA MONITOREO DE GEI EN ECOSISTEMAS DE ARROZALES”

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	discovery.researcher.life Fuente de Internet	1%
2	infocarbono.minam.gob.pe Fuente de Internet	1%
3	biocarbono.org Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Consorcio CIXUG Trabajo del estudiante	<1%
5	es.scribd.com Fuente de Internet	<1%
6	www.fontagro.org Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1%
8	repository.unipiloto.edu.co Fuente de Internet	<1%

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“DISEÑO DE PROTOTIPO MULTISENSOR ECONÓMICO
BASADO EN ARDUINO PARA MONITOREO DE GEI
EN ECOSISTEMAS DE ARROZALES”**

Presentada por:

MIRKO WILLIAMS BONILLA CORDOVA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Ph.D. Diego Alejandro Sotomayor Melo
PRESIDENTE

Ing. José Fernando Alva Yance
MIEMBRO

Mg. Sc. Lena Cruz Villacorta
MIEMBRO

Ph.D. Lisveth Flores del Pino De Wright
ASESORA

Dra. Lía Ramos Fernández
CO-ASESORA

DEDICATORIA

“A mis padres, Mirko y Luz, por acompañarme en cada paso que doy en la búsqueda de ser mejor persona y profesional.

A mi abuela, que siempre fue el apoyo incondicional en el hogar que me dio fuerzas para continuar.

A mis hermanos, por todo su apoyo incondicional, espero les sirva de ejemplo de que se puede lograr.

A mi novia, los amaneceres dejaron de ser mis favoritos por que las estrellas más bonitas las encontré en tus ojos”

AGRADECIMIENTOS

Al Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PRO-CIENCIA) de PROCIENCIA-Perú bajo el 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 la emisión de gases de efecto invernadero en los arrozales en beneficio de los agricultores de la región Lambayeque” (Contrato: PE501078113-2022)

A mis asesoras, Ph.D. Lisveth Flores del Pino y Dra. Lia Ramos Fernández, por la oportunidad, confianza y asesoramiento en cada etapa del desarrollo de la tesis. También al grupo de investigación TyC “Teledetección y cambio climático aplicado a la agricultura y los recursos hídricos” por el apoyo en la realización de la investigación.

A Andrés, Favio, Ida, a todos y todas las practicantes que me dieron su apoyo en este viaje de muchas experiencias, que las mantendré vivas en el recuerdo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. EL CULTIVO DE ARROZ (Oryza sativa).....	4
2.1.1. CICLO VEGETATIVO	4
2.2. ROL DE LOS ARROZALES EN EL CAMBIO CLIMATICO	6
2.2.1. METANO – CH ₄	6
2.2.2. ÓXIDO NITROSO – N ₂ O	6
2.2.3. DIÓXIDO DE CARBONO – CO ₂	7
2.2.4. CAMBIO CLIMÁTICO.....	10
2.3. INTERCAMBIO NETO DE ECOSISTEMA (NEE)	10
2.4. PROTOTIPO MULTISENSOR	12
2.4.1. ANTECEDENTES EXPERIMENTALES	12
2.4.2. ARDUINO DUE.....	13
2.4.3. SENSOR MQ-135 y MQ-9	14
2.4.4. SENSOR MHZ19B.....	15
III. METODOLOGIA.....	16
3.1. ZONA DE ESTUDIO	16
3.2. MANEJO DE CULTIVO	17
3.3. PROCEDIMIENTO	19
3.3.1. MONITOREO DE EMISIONES DE GEI CON PROTOTIPO MULTISENSOR	19
3.3.2. VARIACION DIURNA DE NEE	27

IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1.	MONITOREO DE EMISIONES DE GEI CON PROTOTIPO MULTISENSOR	31
4.2.	VARIACION DIURNA DEL INTERCAMBIO NETO DE ECOSISTEMA (NEE)	35
4.2.1.	NEE, RECO Y SU INTERACCIÓN CON VARIABLES AMBIENTALES	38
4.2.2.	COMPARACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS	40
4.3.	RENDIMIENTO DEL PROTOTIPO MULTISENSOR	42
V.	CONCLUSIONES	46
VI.	RECOMENDACIONES	47
VII.	BIBLIOGRAFÍA	48
VIII.	ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características fisicoquímicas del suelo	18
Tabla 2. Características fisicoquímicas del agua	19
Tabla 3. Componentes del prototipo multisensor	20
Tabla 4. Flujo medio de CH ₄ (mg m ⁻² hr ⁻¹) para diferentes etapas de crecimiento de las parcelas de arroz.....	33
Tabla 5. Flujo medio de N ₂ O (mg m ⁻² hr ⁻¹) para diferentes etapas de crecimiento de las parcelas de arroz.....	34
Tabla 6. Flujo medio de CO ₂ (mg m ⁻² hr ⁻¹) para diferentes etapas de crecimiento de las parcelas de arroz.....	35
Tabla 7. Intercambio neto de ecosistemas (NEE) diurno para diferentes etapas de crecimiento de las parcelas de arroz	36
Tabla 8. Principales características ambientales en los estudios previos de NEE y esta investigación.	40
Tabla 9. Prueba U de Mann-Whitney para los valores obtenidos comparados con el análisis cromatográfico.	43
Tabla 10. Prueba U de Mann-Whitney para los valores obtenidos comparados con Chatterjee <i>et al.</i> , (2020); Kumar <i>et al.</i> , (2021) y Neogi <i>et al.</i> , (2021).	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fases de crecimiento y etapas fenológicas del cultivo del arroz.	4
Figura 2: Esquema que representa los procesos involucrados en la producción y difusión de CH ₄ en la atmosfera.....	6
Figura 3: Emisión de GEI (MtCO ₂ eq) por sector en 2018.	7
Figura 4: Principales países emisores de CO ₂ en 2021.	8
Figura 5: Distribución porcentual de emisiones netas por sectores en el Inventario Nacional de GEI 2019.....	9
Figura 6: Distribución de emisiones de GEI por subcategorías del sector Agricultura.....	9
Figura 7: Efecto del incremento de GEI en el calentamiento global.	10
Figura 8: Variación diurna de NEE en diferentes etapas de crecimiento para el cultivo de arroz.	11
Figura 9: Métodos de monitoreo de NEE.....	12
Figura 10: Placa de Arduino Due.	13
Figura 11: Sensores electroquímicos.	14
Figura 12: Sensor NDIR “MHZ19B”	15
Figura 13: Ubicación de la zona de estudio	16
Figura 14: Condición climática predominante durante el estudio.	17
Figura 15: Configuración de las parcelas y ciclo fenológico del estudio.	18
Figura 16: Prototipo multisensor para monitoreo de GEI.....	21
Figura 17: Esquema electrónico del prototipo de medición de GEI.....	22
Figura 18: Diagrama de flujo del sistema de multisensores.....	23
Figura 19: Cámara estática transparente	24
Figura 20: Código de calibración para los sensores MQ.	26
Figura 21: Grafica de correlación entre el sensor DHT22 y la estación automática	26
Figura 22: Flujo de GEI (mg m ⁻² hr ⁻¹) en las parcelas de arroz.....	32

Figura 23: NEE diurno ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para diferentes etapas de crecimiento de las parcelas de arroz.....	35
Figura 24: Crecimiento del arrozal en diferentes etapas del ciclo.....	37
Figura 25: El mapa de calor de correlación De Spearman (R) entre NEE, Reco y variables ambientales.	38
Figura 26: Variación diurna promedio de los principales factores ambientales.....	39
Figura 27: Comparación de la variación diurna del NEE en diferentes etapas del ciclo fenológico del arroz.....	41
Figura 28: Coeficientes de determinación entre los valores de NEE ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) calculados con el analizador portátil y estudios previos.	44

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Comparación de la variación diurna de NEE ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en macollamiento.....	58
Anexo 2. Comparación de la variación diurna de NEE ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en primordio floral.....	58
Anexo 3. Comparación de la variación diurna de NEE ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en estado de huso.....	59
Anexo 4. Comparación de la variación diurna de NEE ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en floración.....	59
Anexo 5. Panel fotográfico.....	60

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Acrónimo

AER	Área Experimental de Riego
DDS	Días Después de la Siembra
EC	Eddy Covariance
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GPP	Gross Primary Production
INGEI	Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
NDIR	Non Dispersive Infrared Detector
NEE	Net Ecosystem Exchange
R	Coefficiente de Spearman
Reco	Respiración del ecosistema
UNALM	Universidad Nacional Agraria La Molina
US EPA	United States Environmental Protection Agency

RESUMEN

El calentamiento global está influenciado por el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. El arroz (*Oryza sativa*) es el segundo alimento básico principal del mundo y una importante fuente de emisiones de GEI. Por otro lado, el Intercambio Neto de Ecosistemas (NEE, por sus siglas en inglés) es el principal factor que influye en el flujo de carbono (C) entre la atmósfera y el suelo. Por eso, los ecosistemas agrícolas son un sumidero de dióxido de carbono (CO₂) en potencia, y en particular los arrozales. Para medir estas emisiones, se diseñó e implementó una cámara estática con un prototipo multisensor portátil de CO₂ para tres parcelas o repeticiones. Además, se instaló una estación meteorológica automática para registrar las variables meteorológicas. La fase vegetativa, reproductiva y de maduración del cultivo duraron 95, 35 y 42 días después de la siembra (DDS), respectivamente. Los resultados del monitoreo estacional de GEI, el analizador subestimó y sobreestimó los flujos de CH₄ y N₂O, respectivamente. Por lo que, estos flujos mostraron diferencias significativas con respecto al método de las cámaras estáticas. En contraste, los flujos de CO₂ tuvieron un comportamiento similar al método de referencia, por lo que, no presentaron diferencia significativa. Por otro lado, los resultados del monitoreo de NEE diurno tuvo la mayor capacidad de absorción de CO₂ a las 10:00 a.m. para las etapas de macollamiento (82 y 89 DDS), primordio floral (102 DDS), estado de huso (111 DDS) y floración (126 DDS). Por otra parte, la máxima emisión de CO₂ en los 82, 111 y 126 DDS fue a las 18:00 p.m. En los 89 y 102 DDS se dio a las 4:00 y 6:00 a.m., respectivamente. El NEE en la etapa vegetativa fue de $-25 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y en la etapa reproductiva fue de $-35 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, siendo esta la mayor capacidad de absorción por parte de las parcelas. Estos resultados no presentaron diferencias significativas con los estudios previos obtenidos covarianza de remolinos (EC). La dinámica estacional de NEE estuvo controlada principalmente por temperatura dentro de la cámara (Tc) (R = -0,69), humedad relativa dentro de la cámara (RHc) (R = -0,66) y Radiación neta (Rn) (R = -0,75).

Palabras clave: sensores; detectores infrarrojos; multisensor económico; captura por cámaras; monitoreo de cultivo; campos de arroz.

ABSTRACT

Global warming is influenced by the increase in the concentration of greenhouse gases (GHG) in the atmosphere. Rice (*Oryza sativa*) is the world's second largest staple food and a major source of GHG emissions. On the other hand, the Net Ecosystem Exchange (NEE) is the main factor that influences the flow of carbon (C) between the atmosphere and the soil. For this reason, agricultural ecosystems are a potential carbon dioxide (CO₂) sink, and rice fields in particular. To measure these emissions, a static chamber with a portable multi-sensor CO₂ prototype was designed and implemented for three plots or repetitions. Additionally, an automatic weather station was installed to record meteorological variables. The vegetative, reproductive, and maturation phases of the crop lasted 95, 35, and 42 days after sowing (DAS), respectively. The results of seasonal GHG monitoring, the analyzer underestimated and overestimated the fluxes of CH₄ and N₂O, respectively. Therefore, these flows showed significant differences with respect to the static chamber method. In contrast, the CO₂ fluxes had a similar behavior to the reference method, therefore, they did not present a significant difference. On the other hand, the results of diurnal NEE had the highest CO₂ absorption capacity at 10:00 a.m. for the tillering stages (82 and 89 DAS), floral primordium (102 DAS), spindle stage (111 DAS) and flowering (126 DAS). On the other hand, the maximum CO₂ emission on 82, 111 and 126 DAS was at 18:00 p.m. In 89 and 102 DAS it occurred at 4:00 and 6:00 a.m., respectively. The NEE in the vegetative stage was -25 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and in the reproductive stage it was -35 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, this being the highest absorption capacity by the plots. These results did not present significant differences with previous studies obtained eddy covariance (EC). The seasonal dynamics of NEE was mainly controlled by temperature inside the chamber (Tc) (R = -0.69), relative humidity inside the chamber (RHc) (R = -0.66) and Net radiation (Rn) (R = -0.75).

Keywords: sensors; infrared detectors; camera trapping; economical multisensor; crop monitoring; rice fields.

I. INTRODUCCIÓN

Según el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático), la composición de la atmósfera es diferente a comparación con la época preindustrial (IPCC, 2018). Los niveles de dióxido de carbono (CO_2) están en 419 ppm y representa el 150% de los valores en el siglo XVIII (NASA, 2023). Este, en conjunto con el metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) componen los Gases de Efecto Invernadero (GEI) más importantes en la atmósfera. Retienen la radiación infrarroja y calientan la superficie del planeta. El incremento de sus concentraciones ha elevado la temperatura de la tierra en 1,1 °C con respecto a los niveles preindustriales, esto ha incrementado el número e intensidad de los eventos climáticos en el mundo (IPCC, 2018). Este desequilibrio térmico es causado principalmente por la emisión de aerosoles a la atmósfera (INTEC, 2012). Por otro lado, la alta demanda de alimentos por parte de la población mundial, que viene en crecimiento acelerado, también aporta a las emisiones de GEI (Moreno-García, 2023).

El arroz (*Oryza sativa*) es un cultivo esencial para combatir la inseguridad alimentaria (Fahad *et al.*, 2019), por ende, más de la mitad de la población mundial lo consume para satisfacer sus necesidades (Bandumula, 2018; Mishra *et al.*, 2022). La práctica agrícola se extiende desde regiones tropicales hasta templadas (Oo *et al.*, 2023). Abarca 114 países y una superficie de 153 Mha en total o el 11% de la tierra cultivable del mundo (Gupta *et al.*, 2021). Es el segundo alimento básico más importante del mundo con una producción anual de 740 Mt (Kumar *et al.*, 2019). En el 2021, el Perú produjo 3,5 Mt de arroz en una superficie de 417,000 ha (FAOSTAT, 2023). Sin embargo, el 90% de la producción de arroz se obtiene actualmente mediante el riego por inundación (Gao *et al.*, 2023), lo que lo convierte en una fuente importante de CH_4 , debido a los procesos anaeróbicos en los suelos inundados. Así mismo, el N_2O se produce principalmente mediante procesos de nitrificación y desnitrificación, los cuales están estrechamente relacionados con la humedad del suelo (Liao *et al.*, 2023). Ambos representan aproximadamente el 30% y el 11%, respectivamente de las emisiones agrícolas mundiales (Gangopadhyay *et al.*, 2023).

El intercambio neto del ecosistema (NEE) es uno de los principales procesos que influye en la concentración de CO₂ en la atmósfera. Los ecosistemas agrícolas son cruciales en la absorción de carbono y de manera particular, los arrozales. Por eso, es importante comprender su función en el flujo de C (Yang *et al.*, 2020). Por ejemplo, Chatterjee *et al.*, (2020), monitorearon arrozales de tierras bajas durante un año (temporada seca y húmeda) mediante la covarianza de remolinos (EC) para evaluar la variación del NEE y encontrar un modelo adecuado para una mejor partición del NEE en sus componentes como la producción primaria bruta (GPP) y la respiración del ecosistema (Reco). Así como (Kumar *et al.*, 2021), que calcularon el NEE en los sistemas de arroz y trigo del noroeste de las llanuras Indo-Gangéticas. Esta fue la primera estimación en una secuencia de arroz-trigo de primavera mediante EC. También, (Neogi *et al.*, 2021), investigaron la caracterización de los flujos de CO₂ en ecosistemas de arrozales de tierras bajas tropicales mediante EC para conocer mejor el impacto ambiental en términos de presupuesto de C en suelo sumergido.

El intercambio tierra-atmósfera de materia y energía se registra mediante EC (Klosterhalfen *et al.*, 2023), el cual es ampliamente usado debido a su base teórica sólida. Sin embargo, es costoso, de difícil manipulación (Zhao *et al.*, 2023), y susceptible a brechas de información (Gao *et al.*, 2023). Por otro lado, las cámaras estáticas son utilizadas para complementar las deficiencias de EC. No obstante, tiene largas jornadas de monitoreo (Li *et al.*, 2023). Además, el costo por el análisis cromatográfico de los gases recolectados es elevado. En este sentido, los sensores infrarrojos representan una oportunidad para solucionar estos inconvenientes. Pues, emplean el principio de infrarrojo no dispersivo (NDIR) para determinar la concentración de CO₂ al instante (Kumar *et al.*, 2021). Además, son fáciles de adquirir, manipular y programar. Es necesario un método de estimación y muestreo automático basado en sensores que puedan reemplazar los métodos convencionales mencionados, y de manera simultánea, aumentar la eficiencia en la estimación de los flujos de GEI (Rajasekar & Selvi, 2022).

Ante esta problemática, se desarrolló esta investigación para contribuir con un método sencillo y económico para el monitoreo de GEI, así mismo, otorgar a la comunidad científica una herramienta para la elaboración de inventarios nacionales de GEI de acorde a la Ley Marco sobre Cambio Climático (LEY N° 30754) y del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INFOCARBONO) aprobado por el Decreto Supremo N° 013-2014-MINAM.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo general fue diseñar un prototipo multisensor para el monitoreo de las concentraciones de GEI (CH₄, CO₂ Y N₂O) y variables meteorológicas (Temperatura y Humedad Relativa) en las parcelas de arroz del Área Experimental de Riego (AER). Para lograrlo, los objetivos específicos son los siguientes:

- Diseñar e implementar el prototipo multisensor portátil para el monitoreo de GEI.
- Calcular el flujo estacional de GEI (CO₂, N₂O, CH₄) y monitorear variables meteorológicas (temperatura y humedad relativa). Además, calcular la variación diurna del NEE en las parcelas de arroz del AER.
- Evaluar la efectividad del prototipo multisensor comparando los resultados con los obtenidos por métodos estandarizados, mediante la prueba U de Mann-Whitney.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. EL CULTIVO DE ARROZ (*Oryza sativa*)

2.1.1. CICLO VEGETATIVO

El ciclo de vida del arroz se divide en tres fases: Vegetativa, Reproductiva y de Maduración. A su vez, estas presentan etapas fenológicas que determinan el estado de desarrollo del cultivo (Figura 1). En cada fase se determinan los diferentes componentes del rendimiento del cultivo. Así mismo, su duración depende de la variedad y de las condiciones climáticas. La fase vegetativa dura aproximadamente entre 30 a 50 días. Empieza con la germinación de la semilla y culmina con la diferenciación del primordio floral, donde se determina el número de macollos que tendrá el cultivo. La fase reproductiva dura entre 30 a 35 días y empieza con la diferenciación del primordio floral y culmina con la floración del cultivo. Por último, la fase de maduración, dura entre 30 a 45 días, esta empieza con la etapa de floración y culmina con la madurez del grano (Garcés & Medina, 2018).

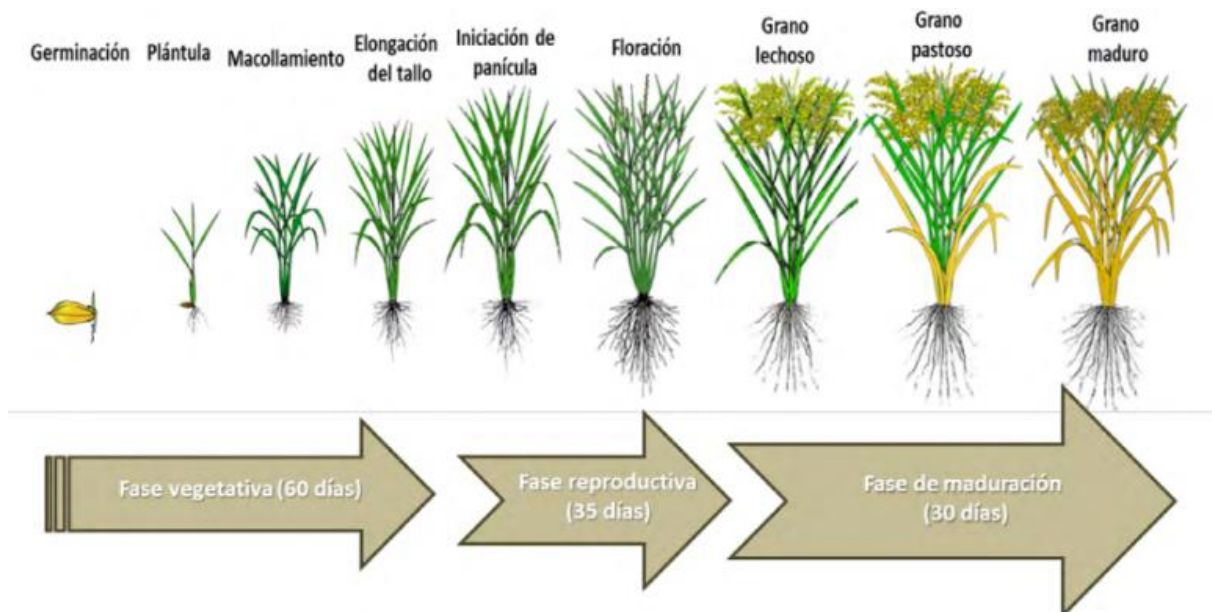


Figura 1: Fases de crecimiento y etapas fenológicas del cultivo del arroz.

FUENTE: García *et al.* (2021)

Así mismo, las etapas fenológicas del ciclo de vida del arroz son las siguientes:

- Emergencia o germinación: semillas pre germinadas luego de haber sido voleadas en el almácigo. Luego de un cierto tiempo, empiezan a brotar sus primeras hojas del coleoptilo.
- Plántula: las plantas del almácigo presentan más de una hoja. En esta fase cuatro hojas emergen totalmente y la primera hoja muere al doceavo día.
- Macollamiento: aparece el primer macollo o hijuelo a partir de la yema axilar en uno de los nudos más inferiores de las plántulas trasplantadas. El momento de registro de la fase se da cuando el macollo tiene una longitud aproximada de 1 cm.
- Elongación del tallo: el cuarto entrenudo del tallo principal, debajo de la panoja empieza a hacerse notable en longitud, hasta cuando está totalmente elongado o hasta cuando la fase fenológica de inicio de panoja comienza.
- Primordio floral: se aprecia el primordio de la panoja al removerse cuidadosamente la vaina de la hoja bandera que está alrededor del tallo principal o de un macollo, donde se podrá ver un cono blanco vellosos de 1 a 1,5 mm de longitud, denominado “punto de algodón”.
- Estado de huso: la panoja diferenciada es visible (se puede distinguir las espiguillas de la panoja) hasta cuando la punta de ella está justo por debajo del cuello de la hoja bandera.
- Floración: momento en que la panoja emerge fuera de la vaina de la hoja bandera, seguido por el proceso de floración, luego las espiguillas de las panojas se abren para que las flores contenidas en su interior puedan polinizarse y fecundarse.
- Maduración lechosa: los granos al ser presionados presentan un líquido acuoso o lechoso.
- Maduración pastosa: los granos al ser presionados se extraen de ellos una masa blanda de color blanco.
- Maduración córnea: los granos al ser presionados están duros.

2.2. ROL DE LOS ARROZALES EN EL CAMBIO CLIMATICO

2.2.1. METANO – CH₄

Posee un potencial de calentamiento global 28 veces más alto que el CO₂ (IPCC, 2023). El cultivo de arroz requiere la inundación del suelo, esto genera un ambiente anaeróbico donde se lleva a cabo la descomposición de la materia orgánica en CH₄. La metanogénesis reduce el CO₂ con el hidrogeno (H₂) y genera CH₄ (Paredes C. & Becerra V., 2015). De la amplia variedad de fuentes de CH₄, el cultivo de arroz es considerado uno de los más importantes. Sin embargo, sus emisiones depende del tipo de suelo, de la cantidad de materia orgánica y fertilizante aplicado, el régimen de agua empleado, el clima, entre otros (Paredes C. & Becerra V., 2015). (Figura 2)

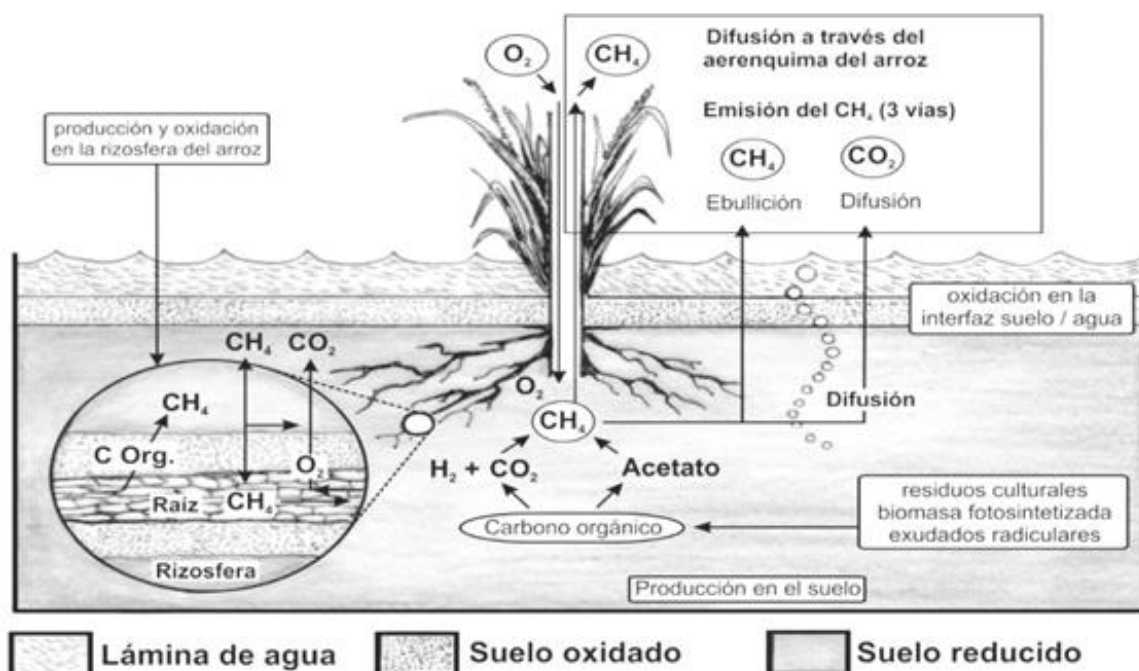


Figura 2: Esquema que representa los procesos involucrados en la producción y difusión de CH₄ en la atmósfera

FUENTE: Paredes C. *et al.* (2021)

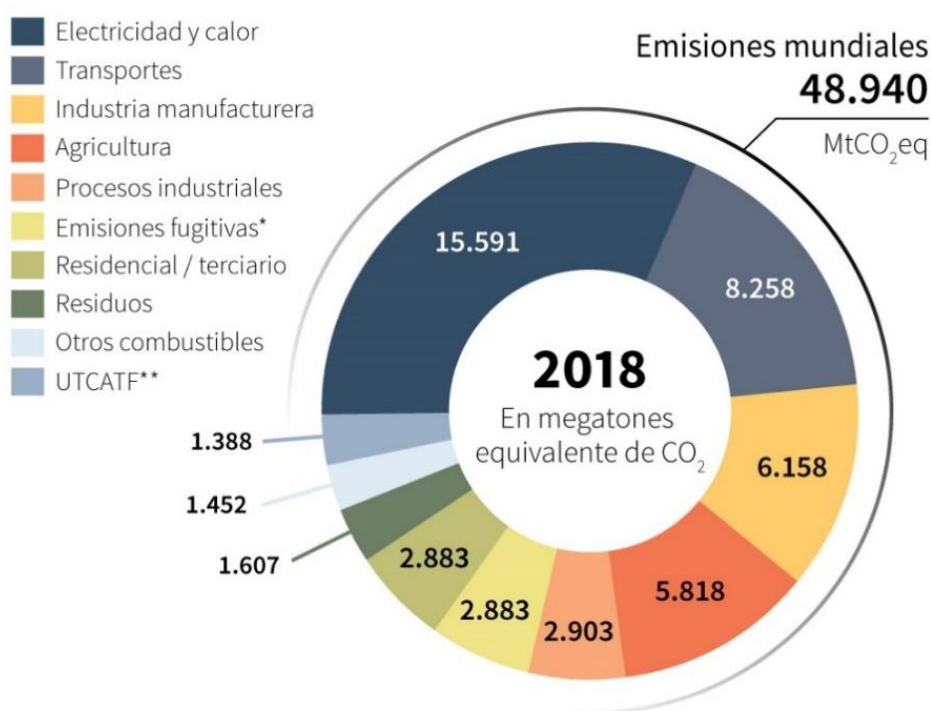
2.2.2. ÓXIDO NITROSO – N₂O

Posee un potencial de calentamiento global 273 veces más alto que el CO₂ (IPCC, 2023). Se produce por la intermitencia entre los regímenes de riego inundado y seco. Los fertilizantes nitrogenados como urea o sulfato de amonio son degradados a amonio (NH₄⁺) por bacterias asimiladoras de nitrógeno (Vallejo *et al.*, 2008). El proceso continúa con la nitrificación, produciendo nitritos (NO₂⁻) y nitratos (NO₃⁻) (Orozco Patiño, 1999; Subbarao *et al.*, 2006).

Las plantas adquieren el nitrógeno requerido para su desarrollo a través del NO_3^- y NH_4^+ , el excedente llega a pozos de agua por lixiviación o se volatiliza a la atmósfera, adoptando diversas formas precursoras de N_2O y del óxido nítrico (NO) (Sanhueza, 1982).

2.2.3. DIÓXIDO DE CARBONO – CO_2

Forma parte del ciclo del carbono, el cual es un proceso natural fundamental en la Tierra que implica la circulación y reciclaje del carbono entre la atmósfera, los océanos, la tierra y los organismos vivos. Sin embargo, la capacidad de los disipadores naturales ha sido superada por la emisión de CO_2 impulsada por las actividades antrópicas (US EPA, 2021), por ejemplo, la quema de combustibles fósiles, la deforestación y UTCUTS (uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura). La Figura 3 representa las emisiones de GEI en el mundo en 2018 separados en los principales sectores de origen. La energía es responsable del 77,01 por ciento de las emisiones de GEI, la agricultura contribuyó con un 15,6 MtCO_2 eq, transporte con 8,3 MtCO_2 eq, la industria manufacturera con 6,2 MtCO_2 eq y la agricultura con 5,8 MtCO_2 eq.



*Emisiones mal controladas: accidentales, difusas o improductivas

**Uso de tierras, cambios de afectación de tierras y bosques

Figura 3: Emisión de GEI (MtCO_2 eq) por sector en 2018.

FUENTE: Agence France-Press (2021)

En tanto, la Figura 4 muestra los principales países emisores de GEI en el mundo en 2021. China, Estados Unidos, India y Rusia son los principales países y representan el 32,9, 12,6, 7 y 5,1 por ciento del total.

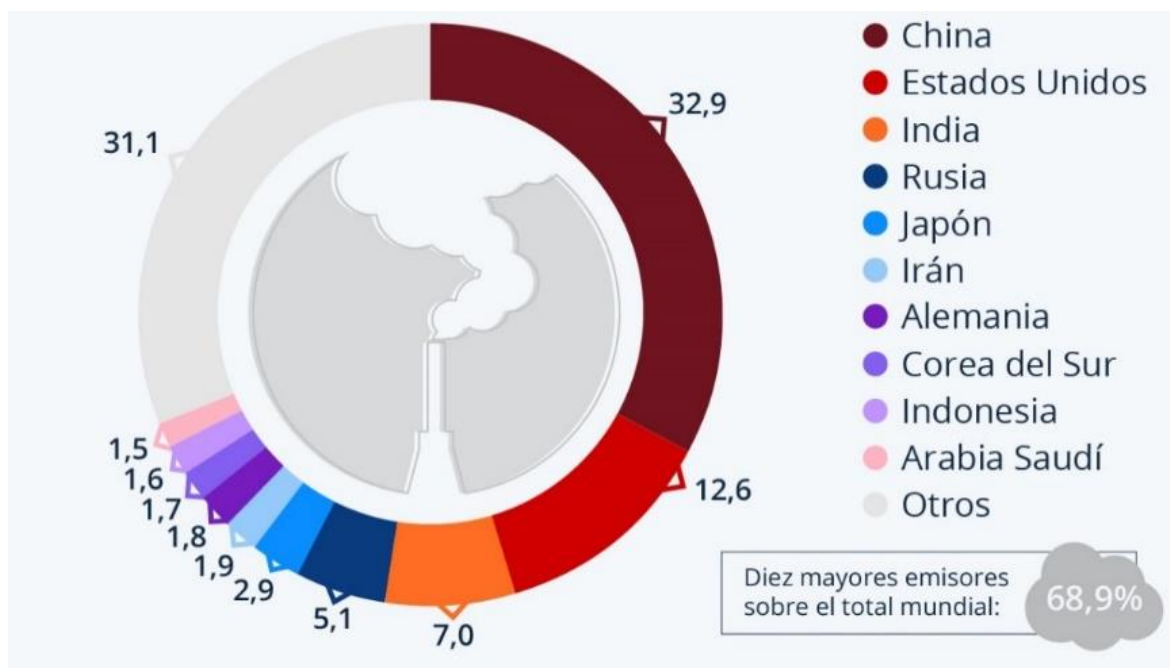


Figura 4: Principales países emisores de CO2 en 2021.

FUENTE: Statista Daily Data (2023)

El Perú cuenta con un inventario nacional de GEI (INGEI). Según (INGEI, 2023), las emisiones netas fueron de 210.404,42 giga gramos de dióxido de carbono equivalente (Gg CO₂eq), distribuidos en 159.395,34 Gg CO₂eq de CO₂; 39.014,02 Gg CO₂eq de CH₄; 11.085,16 Gg CO₂eq de N₂O y 909,91 Gg CO₂eq de HFC. La principal fuente de emisiones de GEI a nivel nacional es el sector “Uso de la tierra, cambio del uso de la tierra y silvicultura” (UTCUTS), que representa el 47,9 por ciento del total. Dentro de este, la principal subcategoría “Tierras de cultivo” aporta 62.542,20 Gg CO₂eq. El segundo es Energía, con 63,238.17 Gg CO₂eq. Dentro de este, destaca la subcategoría Transporte, con 25,646.28 Gg CO₂eq. Los dos principales sectores representan el 76,96 por ciento del total para el 2019. El tercer y cuarto sector son Agricultura con 28.478,34 Gg CO₂eq (13,54 por ciento) y Desechos con 10.418,38 Gg CO₂eq (4,95 por ciento), respectivamente (Figura 5).

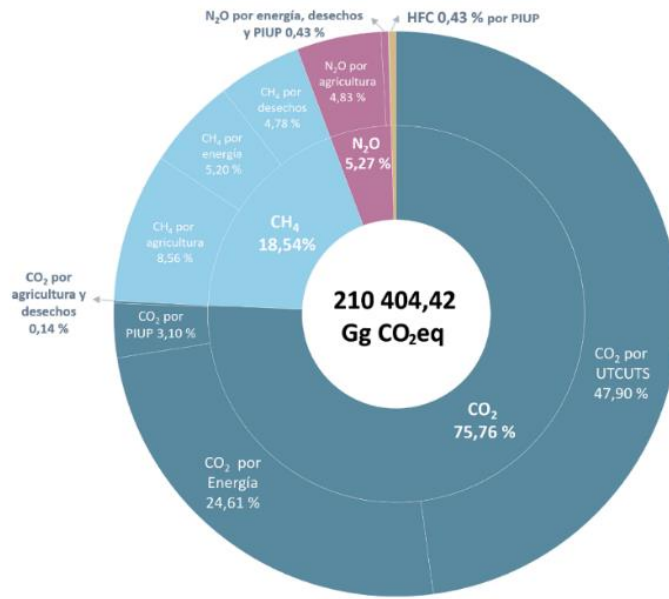


Figura 5: Distribución porcentual de emisiones netas por sectores en el Inventario Nacional de GEI 2019.

FUENTE: INGEI 2019, (2023)

En el 2023, las emisiones del sector agricultura fueron de 28.478,34 Gg CO₂eq, o sea, el 13,54 por ciento del total nacional. Las principales subcategorías son fermentación entérica con 15.432,44 Gg CO₂eq (54,19 por ciento), seguida por las emisiones directas de N₂O de suelos gestionados con 6.853,68 Gg CO₂eq (24,07 por ciento). Estas dos subcategorías representan 78 por ciento de las emisiones netas del sector (INGEI, 2023). Ver Figura 6.

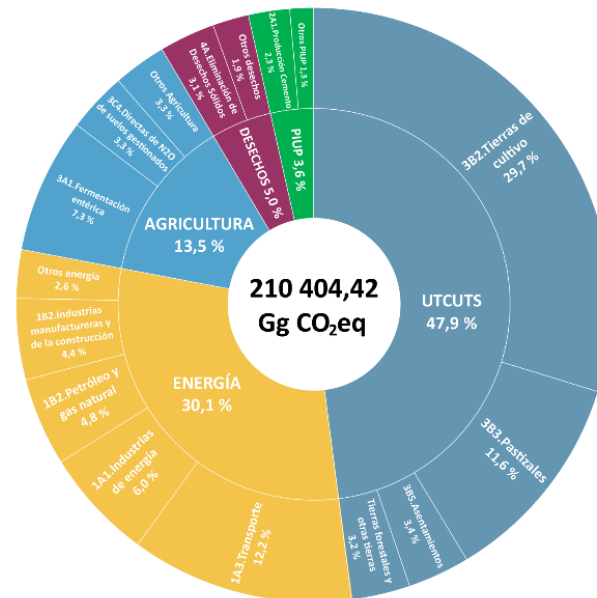


Figura 6: Distribución de emisiones de GEI por subcategorías del sector Agricultura.

FUENTE: INGEI 2019, (2023)

2.2.4. CAMBIO CLIMÁTICO

Se refiere a los cambios a largo plazo en la temperatura del planeta y los patrones climáticos. Es un proceso natural debido a las variaciones en el ciclo solar, pero desde la década de 1800 las actividades humanas han sido el principal impulsor de la aceleración del calentamiento global debido a la emisión de GEI. Estos retienen la energía térmica que proviene de la interacción de la superficie terrestre y los rayos solares, lo que conlleva a un incremento de la temperatura ambiental. El CO_2 , CH_4 y el vapor de agua son los GEI más importantes y en menor medida, el ozono troposférico (O_3), óxidos nitrosos (NO_x) y los gases fluorados (Ver Figura 7). Estos tienen un profundo efecto en el balance energético del sistema terrestre a pesar de que representan sólo una fracción de todos los gases atmosféricos (ONU, 2023).

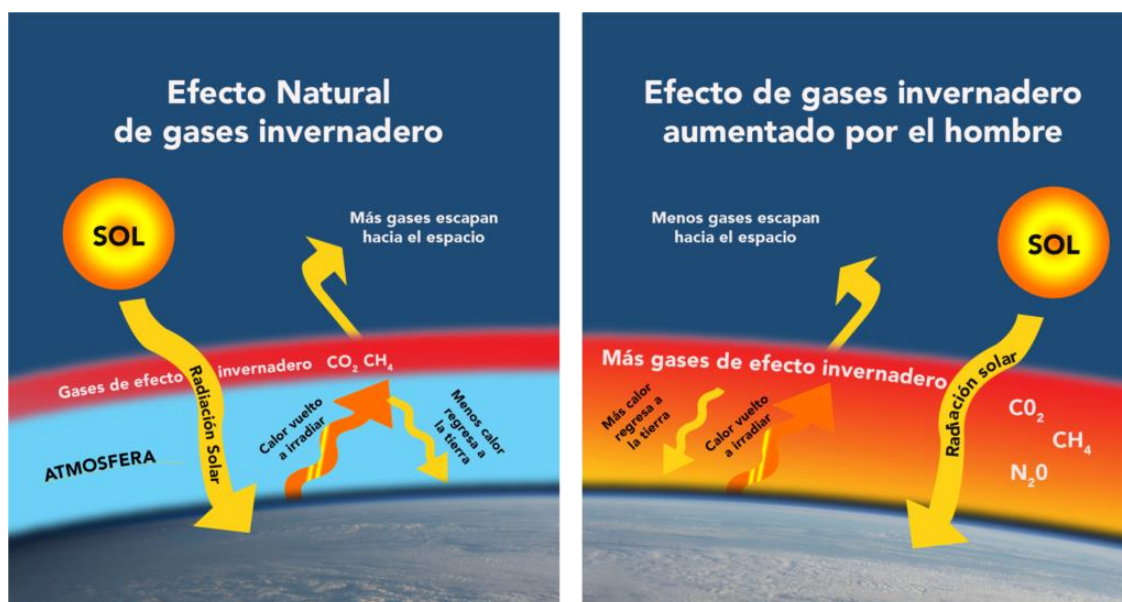


Figura 7: Efecto del incremento de GEI en el calentamiento global.
FUENTE: Voz de América, (2015)

2.3. INTERCAMBIO NETO DE ECOSISTEMA (NEE)

El intercambio neto del ecosistema (NEE, por sus siglas en inglés) es uno de los procesos clave que influyen en la concentración de CO_2 atmosférico (Saito *et al.*, 2005). Es el equilibrio entre los flujos asociados a la asimilación fotosintética por el follaje de las plantas y los eflujos respiratorios de los autótrofos y heterótrofos (Bhattacharyya *et al.*, 2014). De acuerdo con lo anterior, el signo positivo en el NEE representa la transferencia de C del ecosistema a la atmósfera y el signo negativo, el proceso inverso (Hidalgo Sánchez, 2020). La variación diurna del NEE se plasma en la Figura 8.

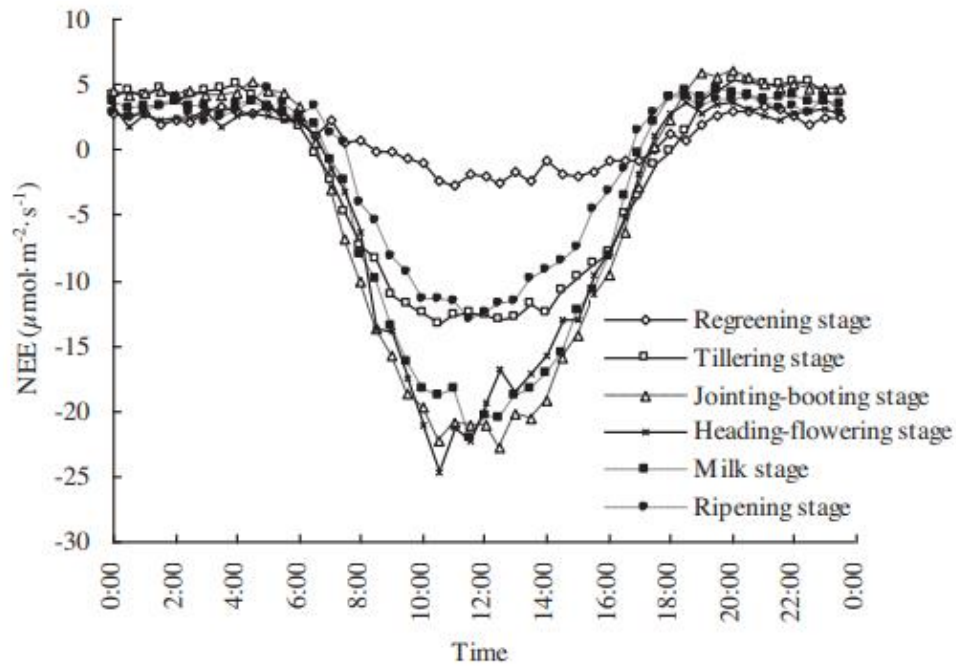


Figura 8: Variación diaria de NEE en diferentes etapas de crecimiento para el cultivo de arroz.
FUENTE: Yang *et al.* (2016)

Los métodos estandarizados que se emplean para calcular NEE son la técnica de covarianza de remolinos (EC) y los sistemas de cámaras estáticas cerradas. Siendo la primera, la más usada por su precisión y su mínimo impacto en el entorno. EC mide directamente el intercambio de masa y energía entre el ecosistema y la atmósfera a partir del cambio en la velocidad del viento y la densidad del aire a cierta altura sobre el dosel (Zou *et al.*, 2004). Consta de anemómetros sónicos, analizadores de gases infrarrojos de trayectoria abierta e higrómetros. También pueden presentar instrumentos accesorios como radiómetros, placas de flujo de calor y termopares, sensores de PAR (radiación fotosintéticamente activa), termohigrometros, sensores de temperatura, reflectómetro, placas de rocío, pluviómetros, etc. (Serrano Ortiz, 2023). Por lo tanto, este método es costoso en su implementación. Además, se han observado ciertas controversias en sus resultados. Ya que presenta dificultades en la medida de los flujos de CO₂ durante la noche, en la ubicación de la torre en terrenos no homogéneos, tiempos de respuesta largos, etc. (Serrano Ortiz, 2023). Las deficiencias del método de covarianza de remolinos son complementadas por el método de las cámaras estáticas cerradas ya que, presentan mayor adaptabilidad y sensibilidad. Así mismo, su operación es sencilla y su costo es menor (Zou *et al.*, 2004). (Ver Figura 9)

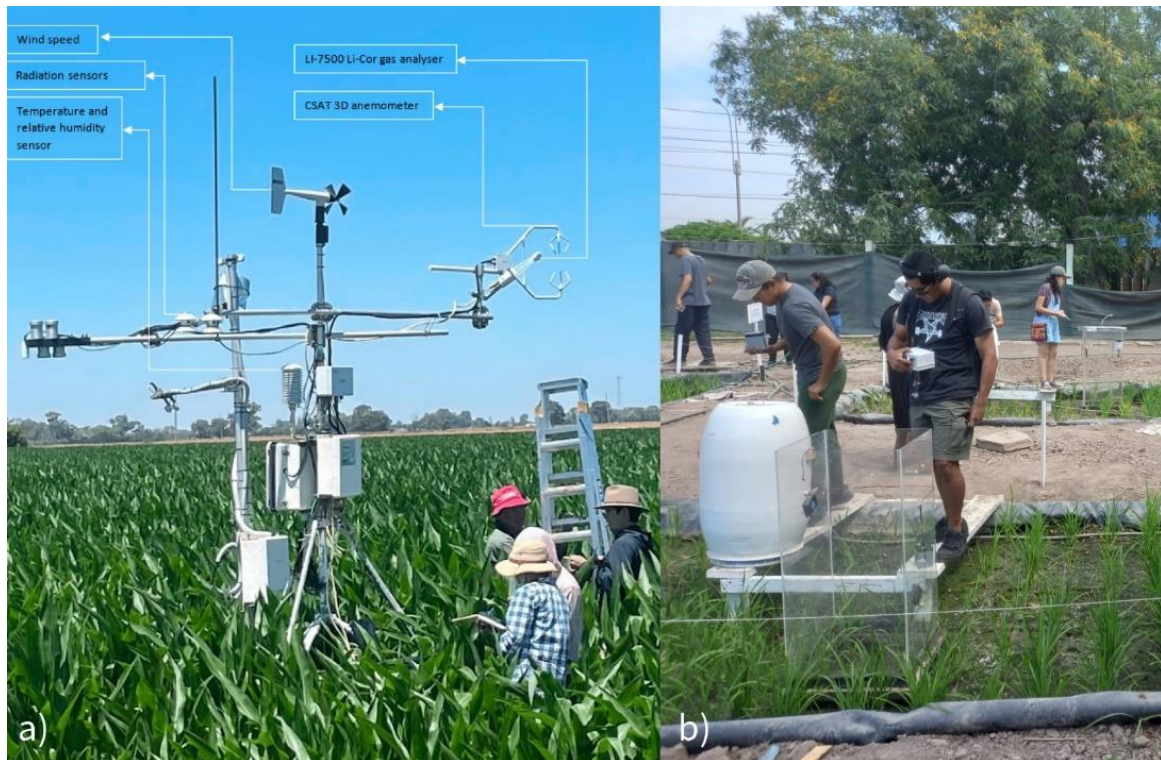


Figura 9: Métodos de monitoreo de NEE. (a) Torre de covarianza de remolinos (EC), (b) Cámaras estáticas transparentes.

FUENTE: Guo *et al.* (2022)

2.4. PROTOTIPO MULTISENSOR

2.4.1. ANTECEDENTES EXPERIMENTALES

La calidad del aire es un tema preocupante a nivel mundial. Sí bien los métodos de referencia utilizan instrumentos sofisticados y costosos, estos no presentan la cantidad ni distribución en un área específica para monitorear el total de las fuentes. Por ende, en los últimos años se ha ido incrementando los proyectos que involucran analizadores económicos de calidad de aire. Por ejemplo, Hakim *et al.* (2021), desarrollan un sistema de monitoreo de calidad de aire que consta de un módulo ESP 32 DOIT DEVKIT, el cual tiene incorporado un módulo de Wi-Fi y Bluetooth incorporado. Consta con los sensores DHT22 para temperatura y humedad relativa, MHZ19B para CO₂, BMP180 para presión atmosférica y SDS 011 para material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}). También, Seo *et al.* (2020), desarrollaron un sistema de detección y prevención de la somnolencia con Raspberry Pi y Arduino. Detecta la concentración de CO₂ dentro de un vehículo, cuyo valor umbral se fijó en 3500 ppm. Así mismo, Rajasekar & Selvi (2022), diseñó un sistema de muestreo de GEI basado en sensores para determinar los efectos de diferentes regímenes de riego y de fertilizantes sobre las emisiones de GEI y la productividad del arroz.

2.4.2. ARDUINO DUE

Arduino es una popular plataforma electrónica construida con base en microcontroladores (arquitectura Atmel AVR y ARM) y componentes auxiliares que facilitan la programación y la interfaz con otros circuitos (Puspasari *et al.*, 2019). Arduino Due posee una placa de Microcontrolador Atmel SAM3X8E con una CPU ARM Cortex-M3. Cuenta con 54 pines de entrada/salida digital (de los cuales 12 pueden utilizarse como salidas PWM), 12 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos seriales de hardware), Conexión USB con capacidad “on-the-go” (OTG), 2 conversores digital a analógico, un reloj (a 84 MHz), Conectores SPI y JTAG, un botón de reinicio y un botón de borrado. A diferencia de las mayorías placas de arduino, está funciona a 3,3 V (Arduino online shop, 2023). La Figura 10 representa de manera esquemática al arduino Due y muestra las características de sus pines.

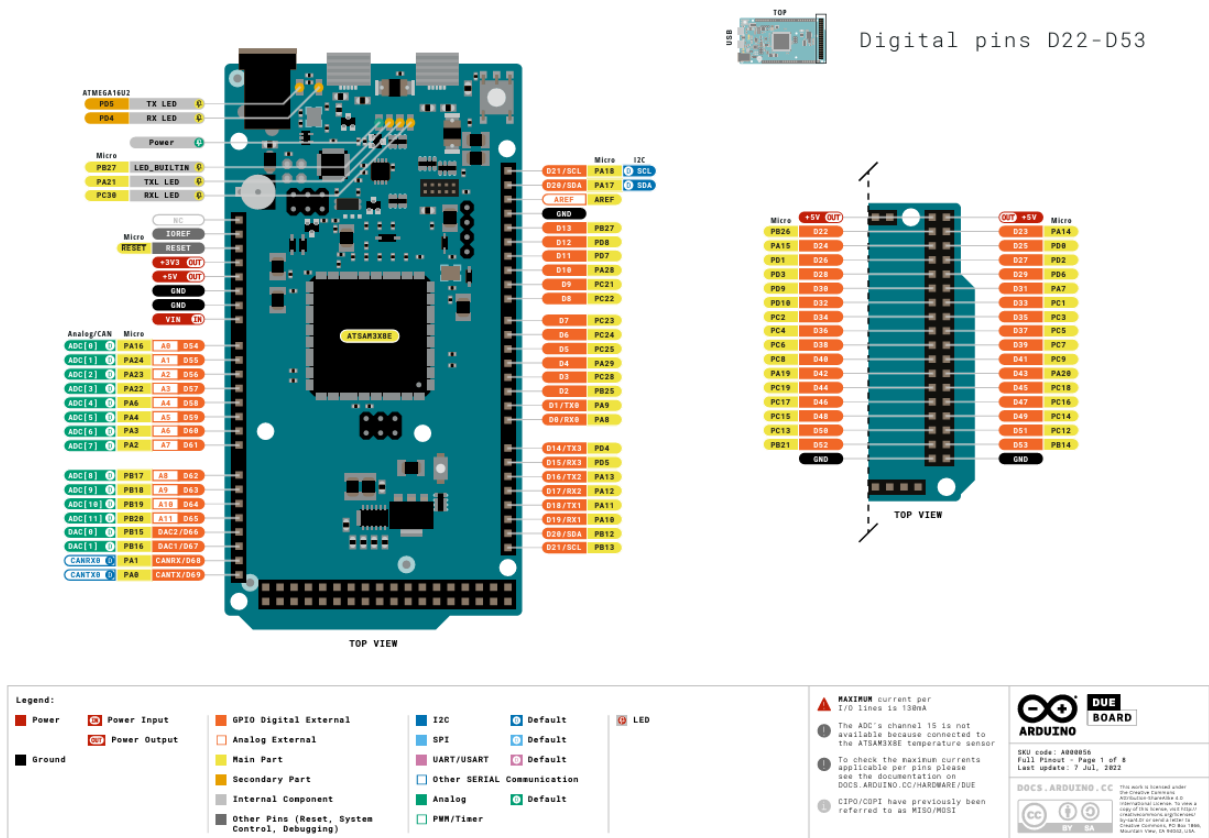


Figura 10: Placa de Arduino Due.
FUENTE: Arduino Online Shop (2023)

2.4.3. SENSOR MQ-135 y MQ-9

El MQ-135 es un sensor electroquímico cuya resistencia varía al estar en contacto con gases como amoníaco, alcohol, benceno, humo, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, etc. Es ideal para la detección de gases nocivos en un rango máximo de 10-1000 ppm (partes por millón). Por otro lado, el detector de gas de combustible MQ-9 es un sensor electroquímico cuya resistencia varía al estar en contacto con gases inflamables como el gas licuado de petróleo (GLP) y el CH₄ en el aire (Ver Figura 11). Es ideal para detectar concentraciones de CH₄ y GLP en el rango de 500 ppm a 10000 ppm, así como, monóxido de carbono (CO) en el rango de 20 ppm – 2000 ppm en el ambiente. Los módulos MQ son sensibles a más de un gas y en diferente proporción a cada uno, por lo que si el objetivo es obtener los valores en unidades correspondientes a la concentración del gas medido es necesario hacer un proceso de escalado mediante software a partir de la curva característica de sensibilidad (Unit electronics, 2023).

El sistema de detección está conformado por: una bobina de níquel-cromo que forma el sistema de calefacción y un revestimiento de dióxido de estaño (SnO₂) (elemento sensible a gases combustibles). Este está cubierto por 2 capas de malla de acero inoxidable que filtran las partículas suspendidas. Una vez se calienta el SnO₂, absorbe al oxígeno en su superficie y a su vez el oxígeno atrae electrones del SnO₂ dificultando el flujo de corriente a través de este. En presencia de gases, la densidad de oxígeno absorbido por el sensor disminuye liberando a los electrones permitiendo que la corriente fluya con mayor libertad por el sensor. El voltaje de salida analógica cambia en proporción a la concentración de gas. Cuanto mayor sea la concentración de gas, mayor será el voltaje de salida y viceversa (Unit electronics, 2023).

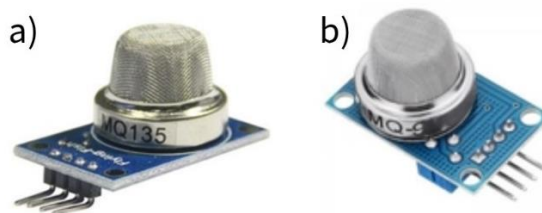


Figura 11: Sensores electroquímicos. a) Sensor MQ-135; b) Sensor MQ-9.
FUENTE: Unit electronics (2023)

2.4.4. SENSOR MHZ19B

El módulo de gas infrarrojo MH-Z19B es un sensor que utiliza el principio de infrarrojo no dispersivo (NDIR) para detectar la existencia de CO₂ en el aire, tiene buena selectividad, no depende del oxígeno y es de larga duración. Dentro del sensor se encuentra una pequeña cámara donde el gas es irradiado con luz infrarroja (IR), este absorbe determinada longitud de onda en el haz de luz IR de acuerdo a su concentración y el sensor mide la diferencia dentro de esta longitud de onda, entregando la concentración de CO₂ en partes por millón (ppm). Así mismo, posee compensación de temperatura incorporada; y tiene salida UART (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal) y salida PWM (modulación por ancho o de pulso). El módulo de gas infrarrojo MH-Z19B NDIR es ampliamente utilizado en: refrigeración (calefacción, ventilación y aire acondicionado), monitoreo de la calidad del aire interior, electrodomésticos inteligentes, proyectos educativos y filtros de aire. La Figura 12 muestra la arquitectura del módulo NDIR.

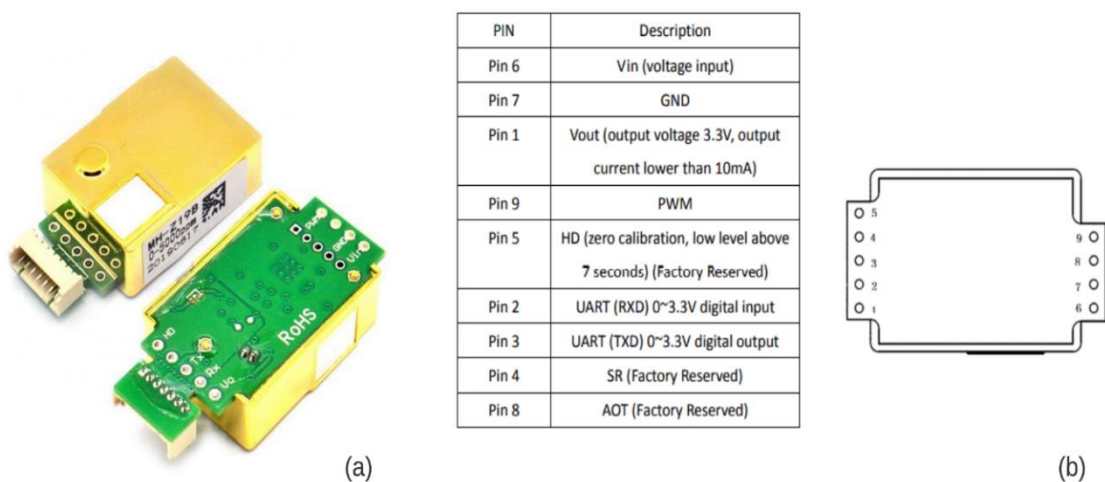


Figura 12: Sensor NDIR “MHZ19B”: a) Módulo; b) Diagrama y definición de pines del módulo.
FUENTE: Mariete (2020)

III. METODOLOGIA

3.1.ZONA DE ESTUDIO

La investigación se realizó en el “Área Experimental de Riego” (AER), en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), distrito de La Molina, Provincia de Lima, Región Lima (12°04'41" S, 76°56'45" W y altitud: 246 m) (Figura 13).

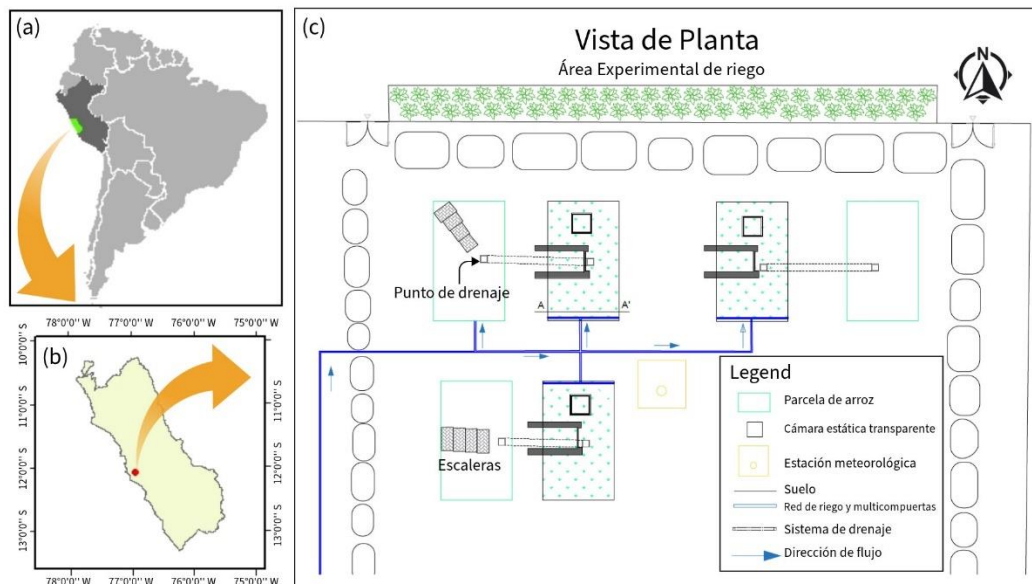


Figura 13: Ubicación de la zona de estudio. (a y b) Ubicación en Lima, Perú; (c) mapa del AER.

Durante el estudio, la temperatura máxima, mínima y promedio fue 32,3, 15,6 y $23,24 \pm 3.21$ °C, respectivamente. La precipitación máxima fue de 2,6 mm y humedad relativa promedio de 77 %. La data meteorológica fue registrada por la estación automática VANTAGE Pro.2 Davis, Hayward, CA, USA; ubicada en el AER (Figura 14).

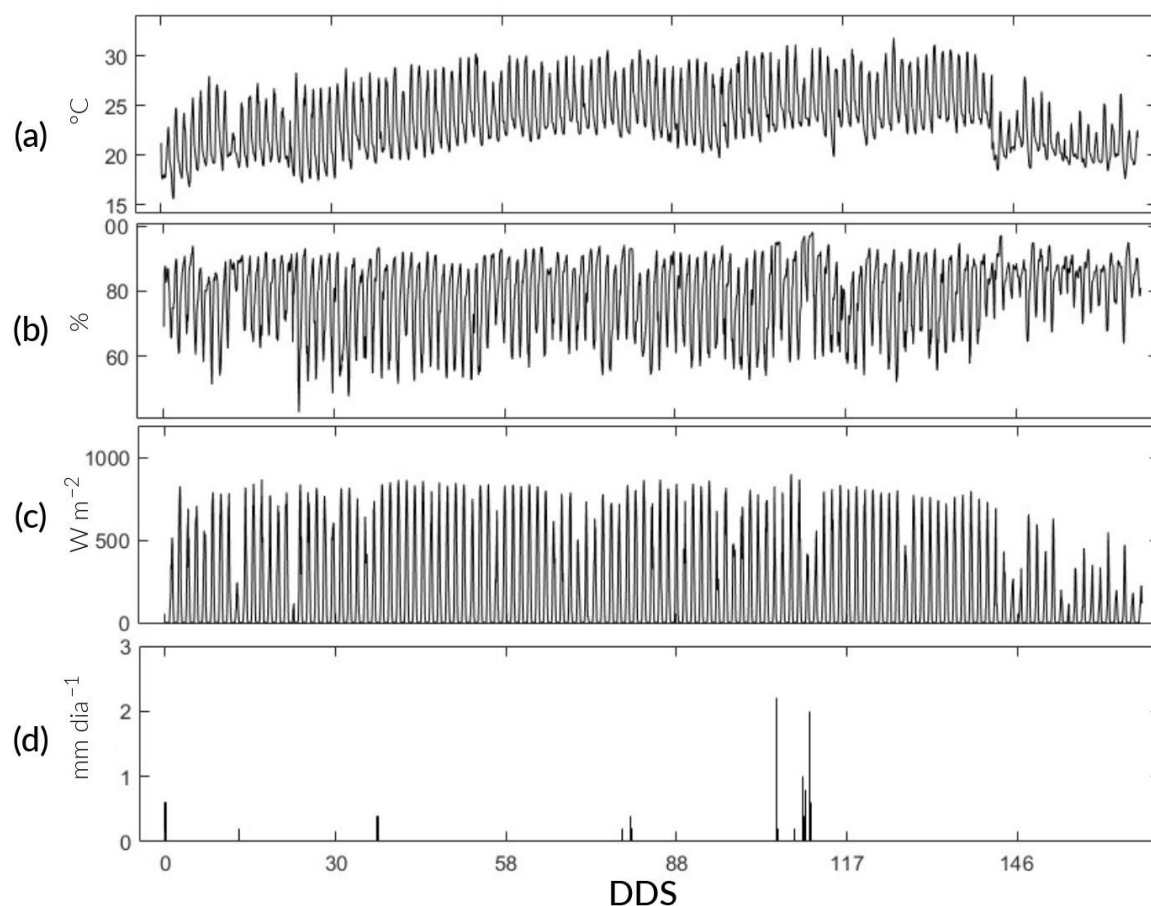


Figura 14: Condición climática predominante durante los días después de la siembra (DDS) del arroz. (a) Temperatura ambiental (Ta), (b) humedad relativa (HR), (c) radiación neta (Rn) y (d) precipitación (pp).

Además, las características fisicoquímicas del suelo se detallan en la Tabla 1.

3.2.MANEJO DE CULTIVO

Se instalaron tres pozas de $3\text{ m} \times 4\text{ m} \times 0,6\text{ m}$ y se impermeabilizaron con geomembrana. Ver Figura a (ANEXO 5). Se preparó el almácigo el 11 de noviembre del 2022, y se trasplantó a los 35 días después de la siembra (DDS). La distribución fue de cinco plántulas de arroz por golpe, espaciadas a $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ cada una (Figura 15a, b). La fase vegetativa, reproductiva y de maduración duraron 95, 35 y 42 DDS, respectivamente. En total, el cultivo duró 172 DDS (Figura 15d). Además, las características fisicoquímicas del suelo se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características fisicoquímicas del suelo

Variables	Valor
Textura	Franco
CE (dS m^{-1})	0,37
pH	7,96
CIC ($\text{meq } 100\text{g}^{-1}$)	10,40
M.O.	3,65
Densidad aparente (g cm^{-3})	1,318
Densidad real (g cm^{-3})	2,74
Porosidad (%)	51,89
Capacidad de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	19,91
Punto de marchitez ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	13,91
CaCO ₃ (%)	4,02
P (ppm)	72,4
K (ppm)	208
N total (%)	0,21

Dónde: σ = Conductividad eléctrica, pH = Potencial de hidrogeno, C.I.C = Capacidad de intercambio catiónico, M.O.S. = Materia orgánica del suelo, CaCO₃ = Carbonato de calcio, P = Fosforo, K⁺ = Ion potasio, N Total = Nitrógeno total.

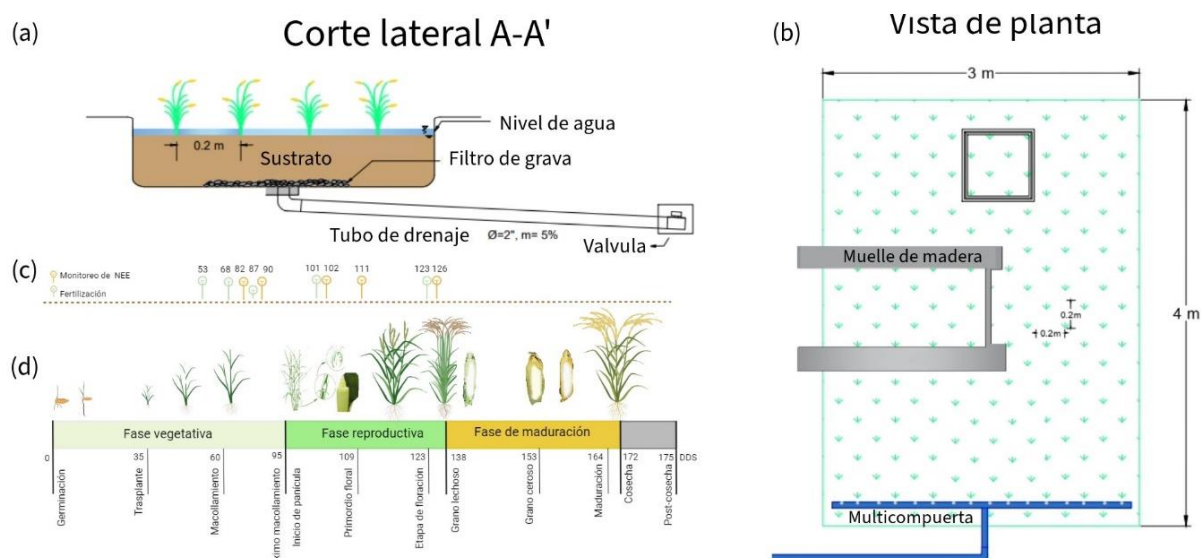


Figura 15: Configuración de las parcelas y ciclo fenológico del estudio. (a y b) Vista lateral y superior de la parcela de arroz, respectivamente (c) Calendario de días de seguimiento y fertilización (en DDS); (d) etapas del crecimiento del arrozal.

El régimen hídrico mantuvo la humedad del suelo entre saturación y una lámina de 5cm. El agua de riego provino del río Rímac y fue almacenada en un tanque de 25 m³. Sus características fisicoquímicas están descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Características fisicoquímicas del agua

VARIABLES	valor
pH	8,2
CE (dS m ⁻¹)	0,67
Ca ²⁺ (meq L ⁻¹)	4,38
Mg ²⁺ (meq L ⁻¹)	0,68
Na ⁺ (meq L ⁻¹)	1,76
K ⁺ (meq L ⁻¹)	0,17
Cl ⁻ (meq L ⁻¹)	1,57
CO ₃ ²⁻ (meq L ⁻¹)	0,10
HCO ₃ ²⁻ (meq L ⁻¹)	3,01
SO ₄ ²⁻ (meq L ⁻¹)	2,13

Dónde: pH = potencial de hidrógeno, σ = conductividad eléctrica, Ca²⁺ = ion calcio, Mg²⁺ = ion magnesio, Na⁺ = ion sodio, K⁺ = ion potasio, Cl⁻ = ion cloruro, CO₃²⁻ = ion carbonato, HCO₃²⁻ = ion bicarbonato, SO₄²⁻ = ion sulfato.

La dosis de fertilización NPK fue de 230-60-90. Se aplicó 100 % de P y K, y 50 % de N en el trasplante. Ver Figura d (ANEXO 5). El resto de N se distribuyó en macollamiento, primordio floral y floración (Figura 15c). Las fuentes de nitrógeno fueron urea, fosfato di amónico (FDA) y “Basacote plus 3M”.

3.3.PROCEDIMIENTO

3.3.1. MONITOREO DE EMISIONES DE GEI CON PROTOTIPO MULTISENSOR

a. Prototipo multisensor para monitoreo de GEI

Se diseñó un prototipo multisensor para el monitoreo de GEI y variables meteorológicas (T y HR) (Figura 16a). Cuyos componentes se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Componentes del prototipo multisensor

Ítem	Factor ambiental	Sensor	Rango de detección	Sensibilidad
(a)	CO ₂	MHZ 19-B, Winsen Electronics, China	0 – 5000 ± 1% ppm	Ta: 0 - 50 °C HR: 0 - 90%
(b)	CH ₄	MQ9, Henan Hanwei, China	500 – 10000 ppm	Ta: -20 a 50 °C HR: 0 a 95%,
(c)	N ₂ O	MQ135, Winsen, China	10 – 3000 ppm	Ta: -10 a 45 °C HR: 0 a 95%
(d)	Temperatura ambiental (Ta) y	DHT22, Aosong Electronics, China	HR: 0 – 100%	HR: ± 2%
	Humedad relativa (HR)		Ta: -40 – 80 °C	Ta: ± 0.5 °C

Además, el analizador requirió de accesorios como: (e) Módulo de reloj de tiempo real (RTC) “DS3231” de MMJ Smart Electronics, f) módulo de memoria microSD de Deeeoe Electronics y g) pantalla LED 16x2 de Yuxian Electronics. Se seleccionó la tarjeta “Arduino DUE” (h) y “Arduino IDE”, ambos de Arduino CC (Ivrea, Italia), como unidad de microcontrolador y sistema de codificación, respectivamente. Los componentes se soldaron en la placa multipropósito (i) para asegurar la conexión a placa. Los componentes se instalaron en una caja de plástico de 150×110×80 mm³. Se alimentó el dispositivo con una batería portátil PHILLIPS de 4000mAh con salida de 5V, cuya duración es de 4 horas continuas. El prototipo en operación se muestra en la Figura 16b.

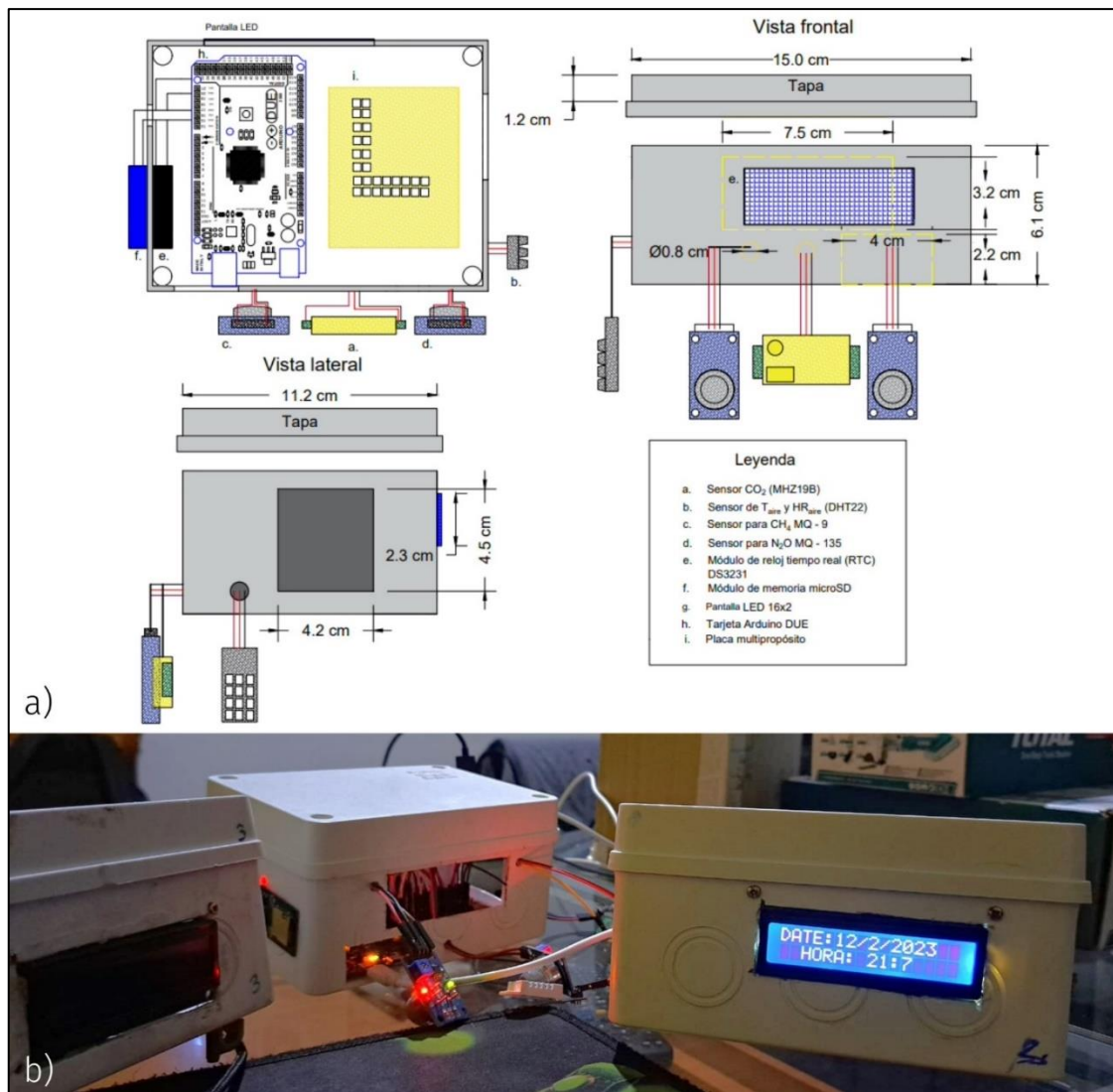


Figura 16: Prototipo multisensor para monitoreo de GEI. (a) Esquema final; (b) Prototipo final.

La Figura 17, detalla el proceso de ensamblaje. En primer lugar, se utilizaron dos cables para electrizar la placa multipropósito, positivo (rojo) y negativo (negro). Luego, se conectaron los sensores y los accesorios con sus respectivas polaridades. En segundo lugar, se conectaron las salidas analógicas de los sensores MQ9, MQ135 y MHZ19B en los puertos analógicos “A0”, “A1” y “A2” del Arduino Due, respectivamente. La salida digital del DHT22 se conectará al puerto PWM (Modulación por ancho de pulso) “2”, este puerto tiene la capacidad de convertir la señal digital a analógica. En tercer lugar, tanto la pantalla LCD cómo el reloj de tiempo real, poseen 2 salidas: SCL (línea por donde se transmite la señal del reloj del sistema) y SDA (línea por donde se transmite la señal de datos). Por lo tanto, se conectaron 2 cables desde el arduino hasta la placa para alimentar 2 columnas con estas características y poder conectar las respectivas salidas de los otros componentes. En cuarto lugar, se conectó los 6 pines de salida del módulo de memoria Micro SD a sus semejantes

de la placa de arduino. Estos pines son: CS (Chip select), SCK (Serial Clock, está señal rige la velocidad a la que se transmite cada bit), MISO (Master Input, Slave Output) y MOSI (Master Output, Slave input). Estos dos últimos, llevan información del esclavo al maestro y del maestro al esclavo, respectivamente. Por último, se conectó la batería portátil mediante un cable USB al puerto nativo del arduino Due. Ver Figuras b y c (ANEXO 5).

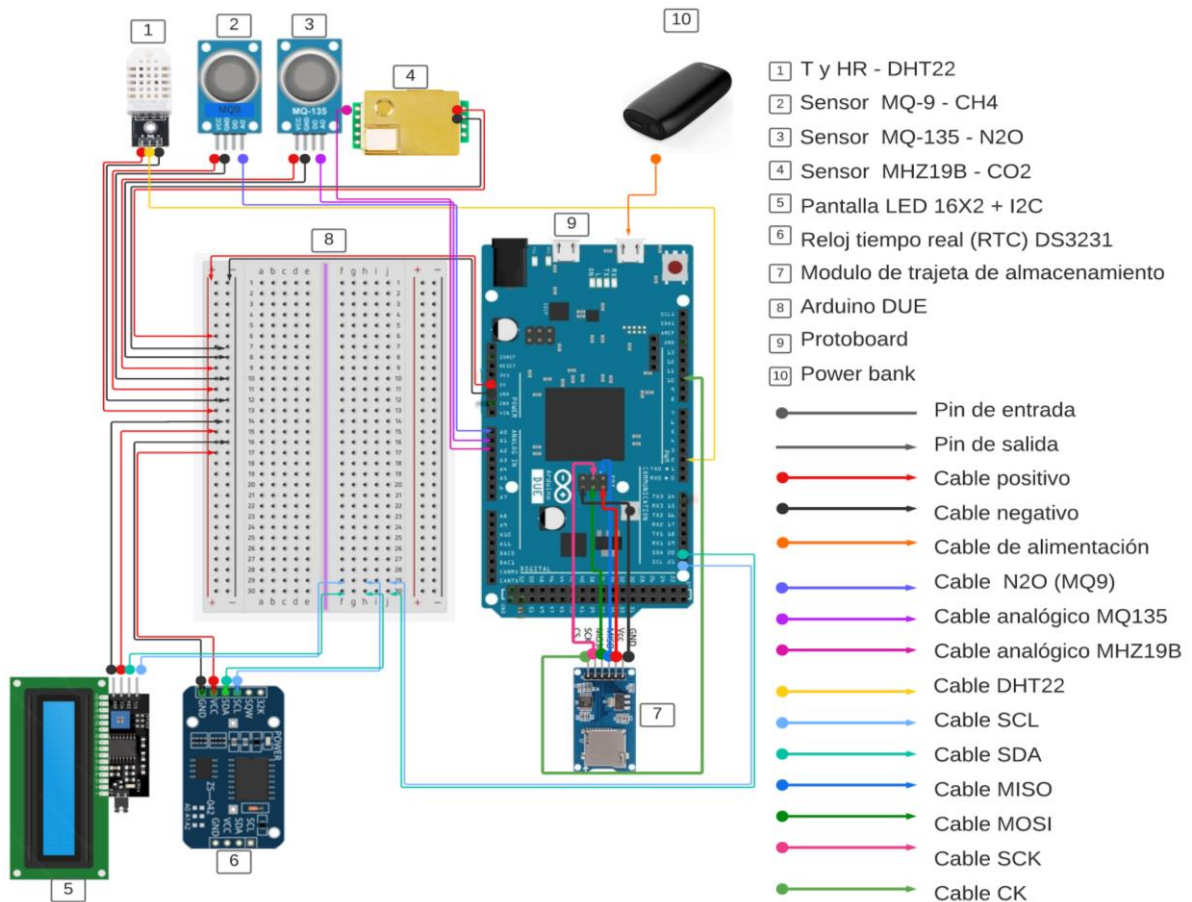


Figura 17: Esquema electrónico del prototipo de medición de GEI.

La Figura 18 representa el diagrama de flujo del todo el proceso de recolección de datos. En primer lugar, se ensambló el prototipo multisensor donde se acopló todos los sensores y componentes a la placa de arduino DUE. En segundo lugar, para la calibración se conectó a la batería portátil para iniciar con la captura de datos. En tercer lugar, se acopló el prototipo operativo a las cámaras estáticas y se inició con el protocolo de monitoreo de GEI. En cuarto lugar, se descargó los datos almacenados en la tarjeta micro SD. Por último, se procesó los datos en el software Excel y se comparó con los resultados obtenidos de la cromatografía de los GEI capturados por el método convencional. Así mismo, se evaluó la variación horaria del intercambio neto de CO₂ de las parcelas mencionadas, su relación con las variables meteorológicas y su diferencia significativa comparados con las experiencias anteriores.

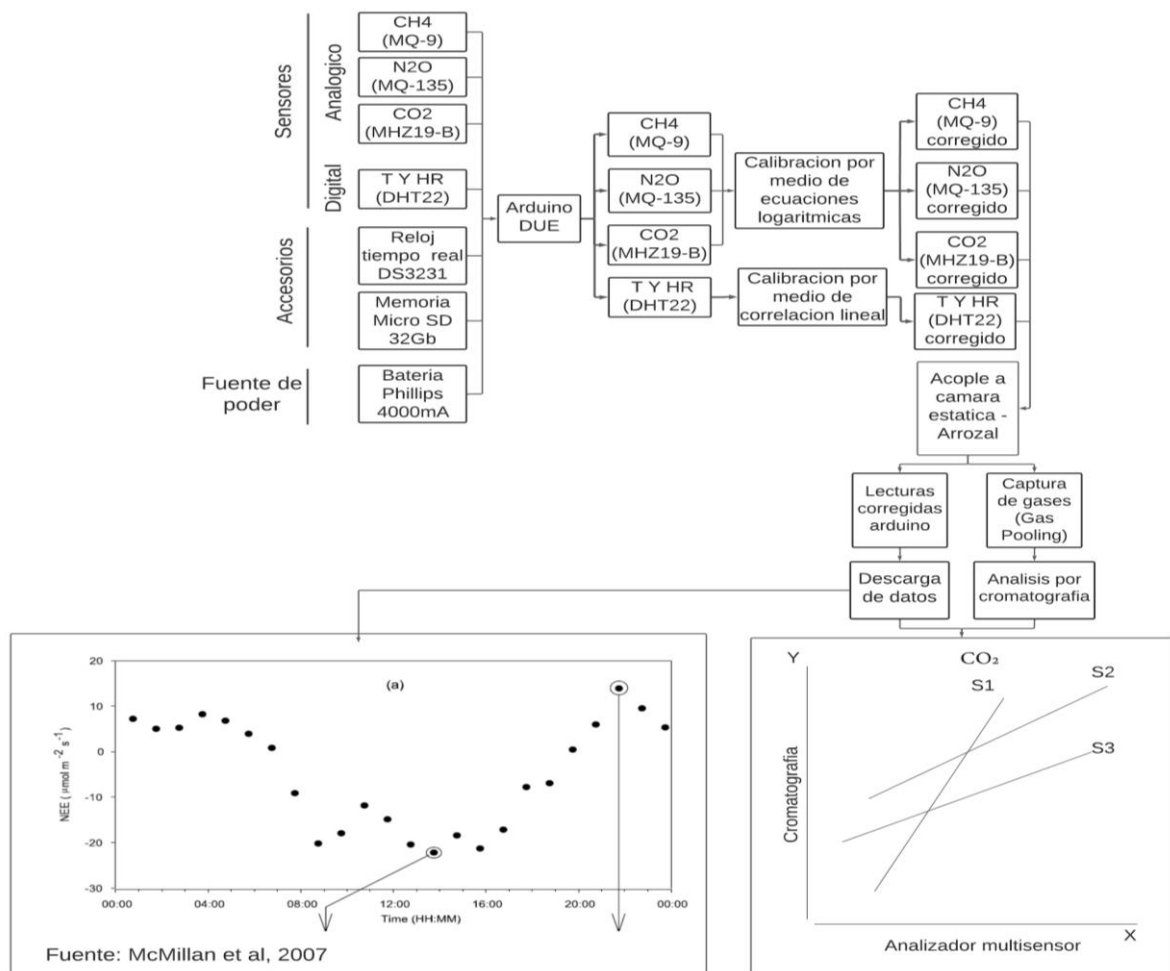


Figura 18: Diagrama de flujo del sistema de multisensores.

b. Diseño, construcción e instalación de la cámara estática

El sistema de monitoreo consistió en una cámara estática cerrada (Frisancho Larico, 2020) y el prototipo multisensor de GEI (Figura 19a). La cámara es de acrílico transparente de 2 mm de espesor cuyas dimensiones son 50 cm x 50 cm x 1 m. Se realizó un agujero en la parte central de la tapa de $\frac{1}{2}$ "", donde se insertará los materiales para la transferencia de gases entre la cámara y el vial (b-d). Además, se realizó un agujero de $\frac{1}{4}$ "" donde se insertó un termómetro (a) en cada cámara. El sistema de mezcla de gases consistió en una batería portátil (e) y 2 ventiladores (f), ambos se conectan por medio de un puerto Universal Serial Bus (USB) (g). Además, la base de metal de dimensiones 0,5 m x 0,5 m x 0,15 m, presenta una ranura de 2 mm de grosor. Esta se instaló 6 cm por debajo de la superficie del suelo, antes del trasplante de forma permanente. Por otro lado, el prototipo se acopló a una de las caras laterales mediante un soporte (h). Ver Figura g (ANEXO 5). El dispositivo terminado se muestra en la Figura 19b.

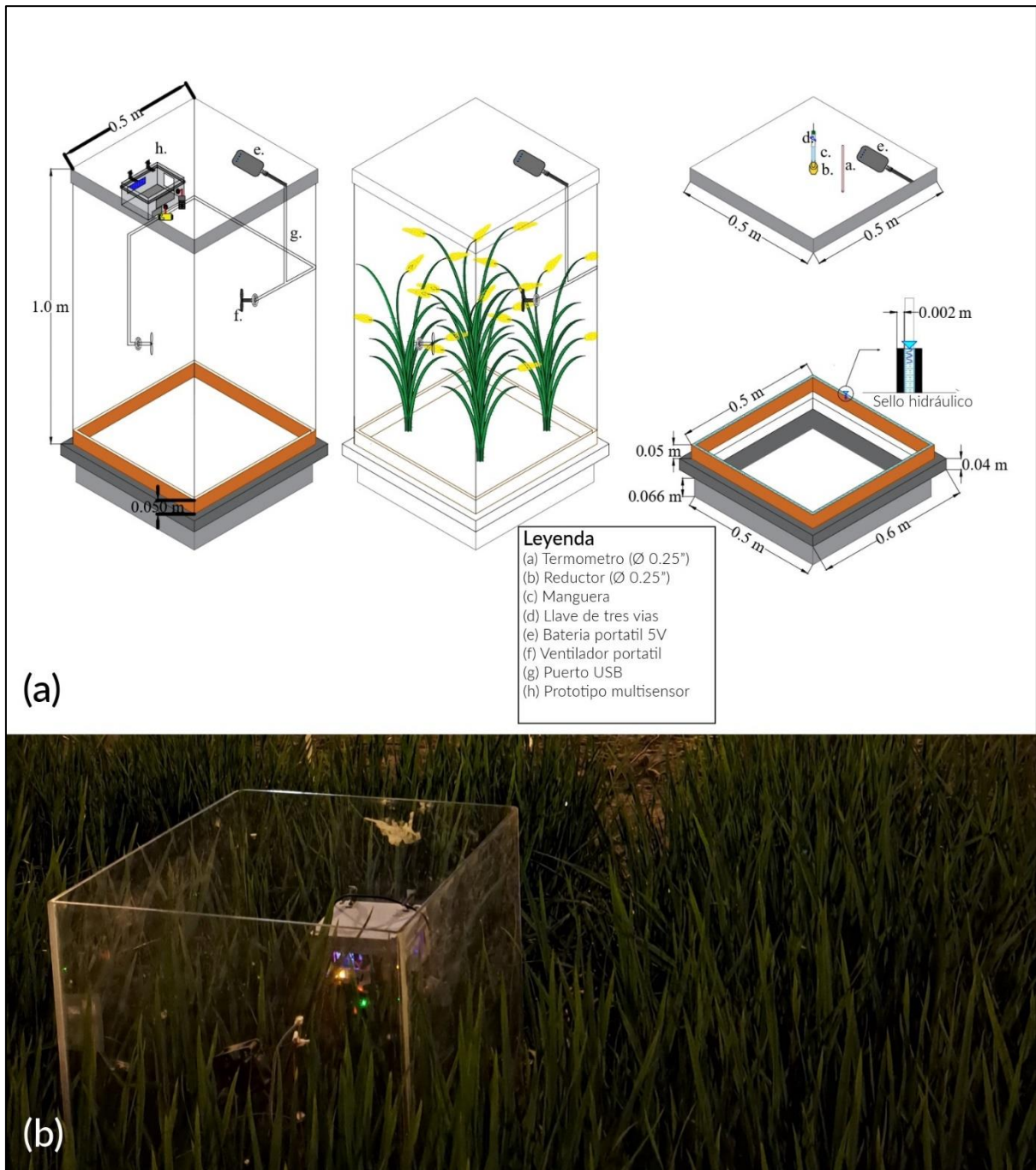


Figura 19: Cámara estática transparente: (a) Esquema; (b) Disposición.

c. Calibración de sensores

Los sensores MQ son dispositivos electroquímicos que detectan la presencia de diferentes tipos de gases, mediante una corriente eléctrica resultante de una reacción química en sus electrodos precalentados mediante un voltaje de 5V. Estos sensores miden la concentración de gas en función de la relación de resistencias. R_0 (resistencia del sensor en una concentración determinada) y R_s (resistencia interna del sensor a la variación de la

concentración del gas). Se utilizó la salida analógica de los sensores para conectar a los pines analógicos del arduino DUE.

En primer lugar, los sensores MQ necesitan entre 24 y 48 horas de precalentamiento. En segundo lugar, en aire limpio, se debe de monitorear el voltaje del sensor por 15 minutos como mínimo hasta que este parámetro se estabilice, mediante el siguiente código programado en el sistema de codificación Arduino IDE:

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
}  
void loop() {  
  
  int adc_MQ = analogRead(A0); //Lemos la salida analógica del MQ  
  float voltaje = adc_MQ * (5,0 / 1023,0); //Convertimos la lectura en un valor de voltaje  
  
  Serial.print("adc:");  
  Serial.print(adc_MQ);  
  Serial.print("  voltaje:");  
  Serial.println(voltaje);  
  delay(100);  
}
```

Para convertir los valores obtenidos en ppm, se escaló los valores de voltaje. Por ende, en tercer lugar, se estimó la ecuación de la curva del datasheet de los sensores MQ-9 y MQ-135. Los datos se graficaron en el software Excel, donde se obtuvieron la línea de tendencia y la ecuación potencial. La variable independiente de dicha ecuación representa el cociente entre R_s y R_0 . En cuarto lugar, R_0 se calculó muestreando y promediando las lecturas cuando los sensores MQ se colocan al aire libre. Mientras que R_s se calculó mediante la ecuación (1)

$$R_s = \frac{5}{\text{sensor value} * \frac{5}{1023}} - 1 \quad (1)$$

Por último, se creó un código en el software arduino IDE con los siguientes datos: Rs y R0 y la ecuación obtenida en Excel (Figura 20). Con todo esto, los valores analógicos de los sensores MQ son transformados a valores en ppm.

```
float MQ9_CH4 = analogRead(0);
float VOLTCH4 = MQ9_CH4 * (5.0 / 1023.0);
float RS_CH4 = ((5 - VOLTCH4) / VOLTCH4);
float R0_CH4 = 0.670; //SACARLO DE LA CALIBRACION
float aCH4 = 3.2145;
float bCH4 = -0.3847;
float sensor1 = pow(((RS_CH4 / R0_CH4) / aCH4), (1 / bCH4));

float MQ135_N2O = analogRead(1);
float VOLTN2O = MQ135_N2O * (5.0 / 1023.0);
float RS_N2O = 1000*((5 - VOLTN2O) / VOLTN2O);
float R0_N2O = 423; //SACARLO DE LA CALIBRACION
float aN2O = 6.4921;
float bN2O = -0.404;
float sensor2 = pow(((RS_N2O / R0_N2O) / aN2O), (1 / bN2O)); //SENSOR 2 ES N2O
```

Figura 20: Código de calibración para los sensores MQ.

Por otro lado, el sensor MHZ19B está calibrado con una referencia automática de 400 ppm, por parte del fabricante (Coulby *et al.*, 2021). Por último, el sensor DHT22 se calibró relacionando sus lecturas con los datos horarios obtenidos por la estación meteorológica durante 24 horas (Figura 21).

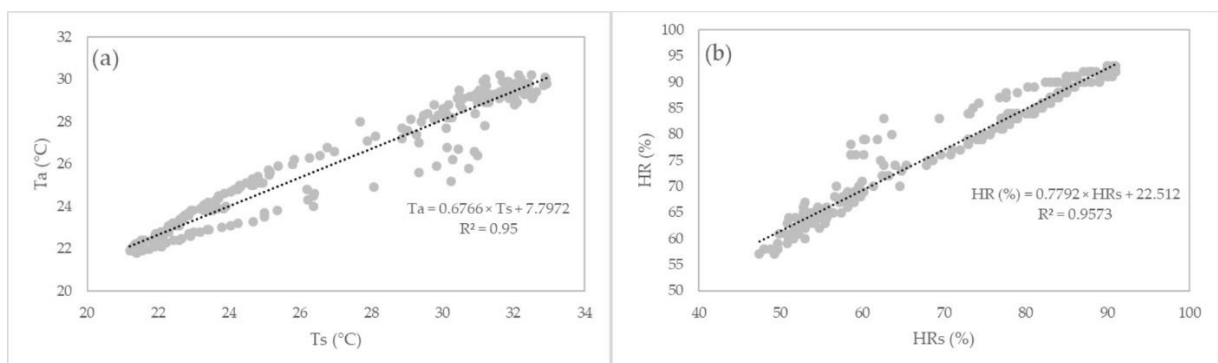


Figura 21: Gráfica de correlación entre el sensor DHT22 y la estación automática. (a) Ta; (b) HR. Donde: Ta es temperatura del aire, Ts es la lectura de temperatura del aire por parte del sensor, HR es humedad relativa del ambiente y HRs es la lectura de humedad relativa por parte del sensor.

3.3.2. VARIACION DIURNA DE NEE

i. Extracción de GEI mediante cámaras estáticas.

A continuación, se detalla el procedimiento del protocolo de extracción de GEI mediante cámaras estáticas. Ver figuras e y f (ANEXO 5)

a) Antes.

- Se revisó que todos los materiales y equipos necesarios para la extracción de gases estén listos.
- Se programó las fechas con frecuencia semanal en el período de muestreo (fase vegetativa hasta post cosecha), en caso de aplicación de fertilizante, se realizó una colecta antes de la fertilización, y dos días después para evaluar su influencia en la emisión de gases.
- Se rotularon los viales de vidrio, unos pequeños frascos en donde se almacenarán las muestras de gases; de acuerdo al número de poza (1,2 y 3) y repetición (T0, T20, T40 y T60) y fecha de muestreo.
- Tres días antes de la fecha de extracción de gases, se aseguró una lámina de agua de 10 centímetros en las parcelas con riego por inundación. Los días que no se realizan extracciones de gases, mantener altura de 5 centímetros aproximadamente.
- Se verificó el correcto funcionamiento de los ventiladores en cada cámara y se designó a un personal que controló el tiempo de inicio y fin de la extracción de muestra de gases en cada tiempo (1 minuto), quien a su vez registró los datos medidos en campo y observaciones durante la extracción de gases.

b) Durante

- Para un control de calidad de muestra de gas, se tomó un blanco en campo, una muestra de aire del ambiente que se colecta antes y después del muestreo de gases del cultivo. Con una jeringa de 60 ml, se bombeó el embolo dos veces completamente en el ambiente, la tercera vez se introdujo 30 ml en el vial. Se retiró 15 ml al ambiente y el volumen restante se introdujo en el vial. Después de la muestra blanco, se inició con el muestreo de gases en la cámara.
- Se realizó la extracción de gas a los 0, 20, 40 y 60 minutos en cada cámara, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Al iniciar el muestreo, se tapó la cámara y encendió los ventiladores, se abrió la llave y se bombeó el embolo dos veces completamente, la tercera vez se introdujo 30 ml en el vial. Se expulsó 15 ml al ambiente y el volumen restante se introdujo en el vial. Finalmente, se cerró las llaves y apagó los ventiladores.
- Se registró la temperatura final del suelo exterior a la cámara y temperatura final del aire interior a la cámara. Se retiró las baterías en cada tiempo de extracción de gas.
- Se protegió los viales inmediatamente con papel de aluminio como empaquetadura y en un ambiente bajo sombra. Para asegurar una correcta extracción de gas, se verificó que el septum del vial no se encuentre hundido, en caso contrario, se reemplazó el vial inmediatamente y repitió el muestreo. Para recuperar el vial, se introdujo la aguja de la jeringa, bombeó el embolo completamente y retiró al medio ambiente.
- Se repitió el mismo procedimiento para los 20, 40 y 60 minutos (T20, T40 y T60) en los días representativos para cada etapa durante todo el ciclo de vida del arroz.

c) Después:

- Se registró la temperatura final del suelo exterior a la cámara y temperatura final del aire interior a la cámara.
- Se protegió los viales cubriendo en papel aluminio, verificando posibles fugas. Se rotuló los paquetes por fecha y tiempo de extracción de gases. Se almacenó las muestras en un ambiente oscuro a temperatura ambiente. Al finalizar período de monitoreo, se enviaron los viales al laboratorio de GEI en Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT, para analizar CH₄ y N₂O en un cromatógrafo de gases (GC-2014 Shimadzu) equipado con detectores de ionización de llama y captura de electrones. Las concentraciones de CH₄ se determinaron con un detector de ionización de llama (FID) y las de N₂O con un detector de captura de electrones (ECD), usando nitrógeno como gas de arrastre (Portela *et al.*, 2013).

ii. Cálculo de flujo de GEI

El cálculo del flujo de GEI se obtuvo mediante la ecuación (2) (Capurro *et al.*, 2015) :

$$\text{Flujo}_{(\text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}, \text{CO}_2)} = \frac{\Delta C}{\Delta t} * \rho * \frac{V}{A} \quad (2)$$

Dónde: $\Delta C/\Delta t$ = cambio de concentración a través del tiempo (ppm min^{-1}), V = volumen de la cámara (m^3), A = área de la cámara (m^2), ρ = densidad del gas corregido por la temperatura de la cámara interna ($^{\circ}\text{C}$) mediante la ecuación de gases ideales ($P \times V = n \times R \times T$).

Para el cálculo de $\Delta C/\Delta t$, se utilizó la ecuación (3). Este utiliza la gradiente de concentraciones (pendiente) de los tiempos de muestreo recolectados por los prototipos multisensores en campo (Pihlatie *et al.*, 2013).

$$C_{(T)} = C_0 + \frac{\Delta C}{\Delta t} * t \quad (3)$$

Dónde: $\Delta C/\Delta t$ = Cambio de concentración a través del tiempo (ppm min^{-1}), C_0 = concentración inicial (ppm) y t es el tiempo (min)

iii. Propuesta de monitoreo diurno de NEE

El monitoreo diurno de CO_2 en las parcelas de arroz inició en macollamiento, la etapa de máximo crecimiento foliar. Las cinco jornadas duraron 24 horas y se efectuaron en simultaneo en las tres parcelas como repeticiones. La fase preparatoria comenzó con el acople de la cámara estática en la base de metal. Luego, se realizó el sello de agua en el acople para evitar la fuga de los gases. Después, se colocó y encendió el prototipo en la cámara para que las lecturas de CO_2 , T_a y HR se estabilicen durante 30 minutos. El monitoreo per se inició con el cierre de la cámara y el encendido los ventiladores durante los 30 primeros minutos de cada hora. El proceso contrario se realizó durante los 30 minutos restantes. Ver Figura h (ANEXO 5).

iv. Procesamiento de datos

Los flujos de emisión se calcularon con base en los cambios de concentración de CO_2 (ppm min^{-1}). En primer lugar, se realizó el análisis de regresión lineal de 30 datos (Yang *et al.*, 2016, Yang *et al.*, 2017 y Yang *et al.*, 2020). En segundo lugar, se calculó el flujo de emisión de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) con las ecuaciones (4-6).

$$\text{Flujo}(\text{CO}_2) = K \times S \quad (4)$$

$$K = \frac{86400 \times P}{10^6 \times R \times T_c} \times \frac{V}{A} \quad (5)$$

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta t} \quad (6)$$

Dónde: K es el factor de acumulación de la cámara ($\text{mol min ppm}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), S es la tasa de variación de la concentración de CO_2 (ppm min^{-1}), P es la presión barométrica (mbar), R es la constante de gases ideales, 0,0831451 ($\text{bar L K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), Tc es la temperatura dentro de la cámara (K), V es el volumen neto de la cámara (m^3) y A es área neta de entrada de la cámara (m^2). Y, en tercer lugar, se empleó el modelo de hipérbola rectangular de Michaelis-Menten para calcular el NEE (Yang *et al.*, 2017). La ecuación empleada fue (7)

$$NEE = \frac{(PPFD \times -P_{max})}{K_m + PPFD} - R_{eco} \quad (7)$$

Dónde: NEE es el flujo neto de CO_2 de los ecosistemas de arrozales ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), PPFD es la densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Pmax es la tasa fotosintética máxima, Km es una constante de ajuste, Reco es la tasa de respiración de los ecosistemas de arrozales ($\mu\text{molm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). En este caso se utilizó los datos de PPFD, Pmax y Km de Yang *et al.* (2016). El NEE diurno para cada etapa fenológica se efectuó promediando los resultados de los tres prototipos.

v. Análisis de datos y eficiencia del prototipo multisensor

El análisis estadístico de los datos obtenidos de las tres repeticiones en simultaneo se realizó mediante Google Colab. Para verificar la normalidad de los datos se utilizó la prueba Anderson Darling, los cuales resultaron ser no paramétricos. Se realizó la prueba estadística U de Mann-Whitney a un nivel de significancia del 95% para evaluar la diferencia significativa entre los flujos medios de GEI obtenidos por el análisis cromatográfico y por el prototipo multisensor. Y también, para evaluar la diferencia significativa entre los valores de NEE obtenidos por diferentes autores y por el prototipo portátil. Además, se realizó la correlación de Spearman (R) entre las variables ambientales, NEE y Reco para conocer cual tiene mayor influencia en las emisiones de GEI.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MONITOREO DE EMISIONES DE GEI CON PROTOTIPO MULTISENSOR

La Figura 22 muestra la variación temporal de los flujos de CH₄, N₂O y CO₂ desde el trasplante hasta la fase de maduración en las parcelas de arroz. Estos resultados provienen de la colecta de GEI por el método de las cámaras transparentes estáticas y en simultaneo con el prototipo multisensor. Con respecto al CH₄, el resultado cromatográfico mostró un aumento gradual en las emisiones con el pasar los DDS. En la fase vegetativa, a los 35 y 59 DDS, los valores fueron de 0,052 y 0,030 mg m⁻² hr⁻¹, respectivamente. Luego, en la etapa de macollamiento máximo se registraron valores de 0,204 y 0,452 mg m⁻² hr⁻¹, respectivamente. En la fase reproductiva continuó el incremento en las emisiones, donde los 101, 105, 109, 123 y 126 DDS presentaron valores de 1,133, 1,140, 1,853, 2,010 y 2,349 mg m⁻² hr⁻¹, respectivamente. Siendo las dos últimas fechas pertenecientes a la etapa de floración, donde se encuentran las máximas emisiones de CH₄. Ya en la fase de maduración las emisiones disminuyen progresivamente hasta la cosecha, a los 139 DDS se obtuvo un flujo de 1,242 mg m⁻² hr⁻¹. Por otro lado, las lecturas del prototipo no tuvieron el mismo comportamiento que los resultados de cromatografía (Tabla 9). Se obtuvieron valores negativos como -0,000064 y -0,046 mg m⁻² hr⁻¹. También, los valores máximos ocurrieron a los 35 y 90 DDS. Además, en los 101 y 105 DDS no se registraron datos debido que las condiciones ambientales generaron fallas en los componentes del módulo de memoria microSD (Ver Tabla 3).

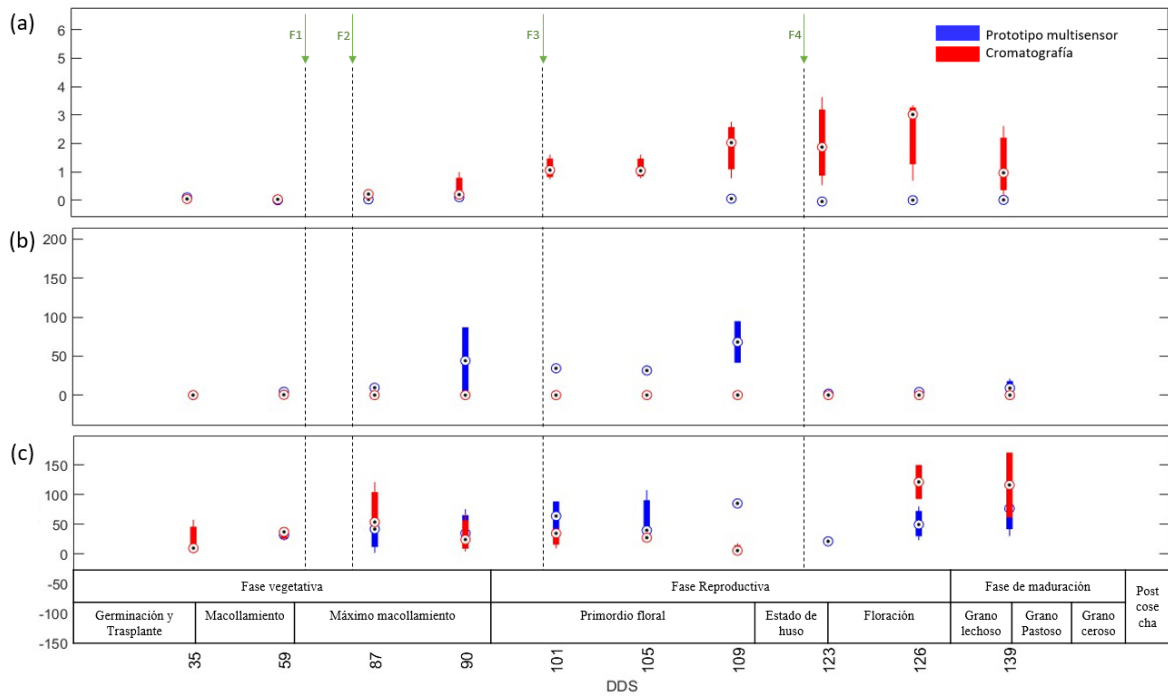


Figura 22: Diagrama Box plot del Flujo de GEI ($\text{mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}$) en las parcelas de arroz. (a) C-CH₄, (b) N-N₂O, (c) C-CO₂.

Se observó un aumento progresivo en la etapa de macollamiento desde 25 DDS ($0,052 \text{ mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}$) hasta 90 DDS ($0,452 \text{ mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}$), siendo esta última fecha la etapa de máximo macollamiento. Ariani *et al.* (2022) menciona que la degradación microbiana, la liberación de exudados de las raíces y el crecimiento de la biomasa microbiana durante la fase de máximo macollamiento son factores que sustentan este incremento. En primordio floral y floración, los flujos siguieron en aumento hasta alcanzar la máxima emisión en 109 y 126 DDS con $1,853$ y $2,349 \text{ mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}$, respectivamente. Habib *et al.* (2023) sugiere que el desarrollo del aerenquima estimula la liberación de exudados y a la fermentación de la materia orgánica del suelo. Luego de floración, se inició con el secado de las pozas para iniciar con la etapa de cosecha. Por este motivo, es que en los 139 DDS el flujo de $1,424 \text{ mg m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ disminuye progresivamente hasta la cosecha.

Tabla 4. Flujo medio de CH₄ (mg m⁻² hr⁻¹) para diferentes etapas de crecimiento de las parcelas de arroz.

N°	DDS	Etapa fenológica	Análisis cromatográfico	Prototipo multisensor
			Flujo de C-CH ₄ (mg m ⁻² hr ⁻¹)	
1	35	Macollamiento	0,052 ± 0,0399	0,102
2	59	Macollamiento	0,030 ± 0,0105	-0,000064
3	87	Macollamiento	0,204 ± 0,0209	0,050 ± 0,060
4	90	Macollamiento	0,452 ± 0,4648	0,110 ± 0,096
5	101	Primordio floral	1,133 ± 0,4405	-
6	105	Primordio floral	1,140 ± 0,4275	-
7	109	Primordio floral	1,853 ± 1,0040	0,053 ± 0,017
8	123	Floración	2,010 ± 1,5549	-0,046 ± 0,009
9	126	Floración	2,349 ± 1,4493	0,006 ± 0,009
10	139	Grano lechoso	1,242 ± 1,2552	0,006 ± 0,010

Los resultados del análisis por cromatografía para N₂O fueron aumentando gradualmente al hasta los 59 DDS, donde se registró la mayor emisión con 0,346 mg m⁻² hr⁻¹. Luego, en la fase reproductiva, en la etapa de floración se observó la segunda mayor emisión con 0,041 mg m⁻² hr⁻¹. Por último, en fase de maduración, la emisión disminuyó a 0,010 mg m⁻² hr⁻¹. Por otro lado, las lecturas del prototipo se vieron sobreestimadas a comparación con los resultados obtenidos mediante el método estándar. Siendo los 35 y 109 DDS, las fechas con menor y mayor emisión con 0,010 y 68,040 mg m⁻² hr⁻¹, respectivamente. En contraste, los resultados obtenidos por el prototipo fueron sobreestimados en todas las fechas de monitoreo, esto se pudo deber a errores al momento de calibrar el sensor o a las condiciones por encima de su funcionamiento óptimo dentro de la cámara estática. No se encontraron variaciones significativas luego de los periodos de riego ya que se logró mantener una lámina de agua de 5 cm durante todo el periodo de estudio. Así mismo, no se encontraron variaciones en los flujos de N₂O luego de las fechas de fertilización. Esto no concuerda con Loaiza *et al.* (2024), que si registraron aumentos significativos en los flujos de N₂O luego de la aplicación de fertilizantes químicos durante el crecimiento del arroz (Ver Tabla 4), debido a un incremento en la actividad microbiana.

Tabla 5. Flujo medio de N₂O (mg m⁻² hr⁻¹) para diferentes etapas de crecimiento de las parcelas de arroz.

N°	DDS	Etapa fenológica	Análisis cromatográfico	Prototipo multisensor
			Flujo de N-N ₂ O (mg m ⁻² hr ⁻¹)	
1	35	Macollamiento	0,049 ± 0,0019	0,010
2	59	Macollamiento	0,346 ± 0,1029	4,314 ± 4,897
3	87	Macollamiento	0,004 ± 0,0045	9,454 ± 7,629
4	90	Macollamiento	0,009 ± 0,0025	43,998 ± 60,781
5	101	Primordio floral	0,016 ± 0,0051	34,339 ± 2,765
6	105	Primordio floral	0,029 ± 0,0189	33,617 ± 4,480
7	109	Primordio floral	0,039 ± 0,0206	68,040 ± 37,691
8	123	Floración	0,026 ± 0,0249	1,847 ± 0,665
9	126	Floración	0,041 ± 0,0218	3,426 ± 1,189
10	139	Grano lechoso	0,010 ± 0,0045	11,504 ± 8,455

Por último, la emisión de CO₂ obtenida por el análisis cromatográfico registra un aumento hasta 87 DDS con un valor de 74,188 mg m⁻² hr⁻¹. Luego, disminuyó progresivamente hasta 109 DDS con 8,457 mg m⁻² hr⁻¹. Para después incrementarse de manera vertiginosa hasta 139 DDS con 116 mg m⁻² hr⁻¹. En cambio, los resultados obtenidos por el prototipo muestran un aumento en las emisiones de 59 hasta 109 DDS con valores de 31,768 a 84,955 mg m⁻² hr⁻¹. Luego, ocurre un descenso donde se llega a la mínima emisión. Esto ocurre a los 123 DDS con 20,19 mg m⁻² hr⁻¹. Después las emisiones aumentan de manera progresiva hasta 139 DDS, cuyo valor es de 62,204 mg m⁻² hr⁻¹. Con respecto a la desviación estándar para todas las fechas de monitoreo resultaron variables, desde 4,689 hasta 40,152 mg m⁻² hr⁻¹. Esto pudo ser causado por la inestabilidad en la conexión con la batería, así como de las condiciones de Tc y HRc que afectaron directamente al sensor de CO₂ (Tabla 5).

Tabla 6. Flujo medio de CO₂ (mg m⁻² hr⁻¹) para diferentes etapas de crecimiento de las parcelas de arroz.

N°	DDS	Etapa fenológica	Análisis cromatográfico	Prototipo multisensor
			Flujo de C-CO ₂ (mg m ⁻² hr ⁻¹)	
1	35	Macollamiento	24,311 ± 28,9042	-
2	59	Macollamiento	32,298 ± 8,6146	31,768 ± 9,733
3	87	Macollamiento	74,188 ± 40,4849	38,816 ± 36,064
4	90	Macollamiento	31,760 ± 32,6135	43,900 ± 27,963
5	101	Primordio floral	28,016 ± 16,8076	63,693 ± 34,682
6	105	Primordio floral	27,123 ± 9,4067	61,040 ± 40,152
7	109	Primordio floral	8,457 ± 7,8064	84,955
8	123	Floración	-	20,910 ± 4,689
9	126	Floración	121,066 ± 40,6834	50,732 ± 28,468
10	139	Grano lechoso	116,004 ± 77,2757	62,204 ± 28,165

4.2. VARIACION DIURNA DEL INTERCAMBIO NETO DE ECOSISTEMA (NEE)

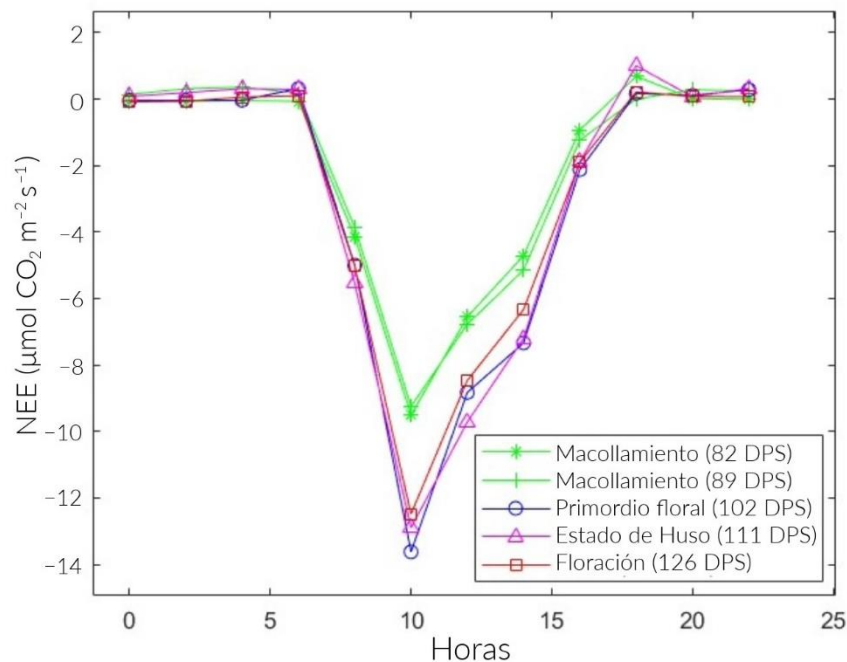


Figura 23: NEE diurno promedio ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para diferentes etapas de crecimiento de las parcelas de arroz

La Figura 23 muestra el comportamiento diurno de NEE en las parcelas de arroz. El signo positivo y negativo indican emisión y absorción neta de CO₂, respectivamente. La máxima

emisión de CO₂ a los 89 y 102 DDS fue a las 04:00 y 06:00, cuyos valores son 0,361 y 0,318 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En cambio, a los 82, 111 y 126 DDS fue a las 18:00 con valores de 0,68, 1 y 0,22 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Por otro lado, la máxima asimilación de CO₂ fue a las 10:00 a.m. cuyos valores para los 82, 89, 102, 111 y 126 DDS fueron -9,51, -9,25, -13,63, -12,9 y -12,5 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

El NEE total máximo ocurrió en la etapa de macollamiento (82 y 89 DDS) con -25,07 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, en promedio. En primordio floral (102 DDS) alcanzo el mínimo con -36,14 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Luego, aumentó progresivamente en estado de huso (111 DDS) con -34,98 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y floración (126 DDS) con -33,83 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Así mismo, la variación estacional del NEE en la fase vegetativa y reproductiva fue de -25,07 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y -34,98 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente (Tabla 6).

Tabla 7. Intercambio neto de ecosistemas (NEE) diurno para diferentes etapas de crecimiento de las parcelas de arroz

Hora s	PPFD Yang <i>et al.</i> (2016)	Dias después de la siembra (DDS)				
		82	89	102	111	126
0	10	-0,061 ± 0,09	0,143 ± 0,25	-0,034 ± 0,17	0,081 ± 0,19	-0,084 ± 0,15
2	10	-0,069 ± 0,05	0,309 ± 0,29	-0,041 ± 0,05	0,194 ± 0,25	-0,065 ± 0,19
4	10	-0,041 ± 0,12	0,361 ± 0,39	-0,036 ± 0,04	0,313 ± 0,47	0,059 ± 0,4
6	10	-0,064 ± 0,03	0,171 ± 0,21	0,318 ± 0,3	0,290 ± 0,47	0,097 ± 0,5
8	200	-4,148 ± 0,17	-3,860 ± 0,54	-4,997 ± 0,59	-5,550 ± 0,36	-5,021 ± 0,28
10	600	-9,511 ± 0,08	-9,245 ± 0,54	-13,626 ± 0,54	-12,901 ± 1,52	-12,489 ± 1,12
12	400	-6,555 ± 0,53	-6,777 ± 0,91	-8,829 ± 1,29	-9,720 ± 0,32	-8,468 ± 0,35
14	300	-4,710 ± 0,9	-5,141 ± 0,63	-7,336 ± 0,48	-7,202 ± 0,36	-6,330 ± 0,28
16	100	-0,928 ± 0,24	-1,233 ± 0,77	-2,123 ± 0,73	-1,881 ± 0,69	-1,899 ± 0,8
18	10	0,686 ± 0,89	-	0,171 ± 0,21	1,003 ± 0,6	0,218 ± 0,42
20	10	0,015 ± 0,18	0,280 ± 0,28	0,110 ± 0,09	0,069 ± 0,21	0,074 ± 0,28
22	10	-0,014 ± 0,04	0,247 ± 0,21	0,282 ± 0,24	0,321 ± 0,52	0,069 ± 0,3

PPFD = Densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Los valores de NEE durante el estudio fueron positivos en la noche y negativos en el día, Este comportamiento está acorde con los resultados obtenidos por Bhattacharyya *et al.* (2014), McMillan *et al.* (2007) y Zhang *et al.* (2023). El ecosistema actuó como sumidero de CO₂ durante el día, es decir, la absorción mediante la fotosíntesis es mayor que la emisión por procesos respiratorios, Y como fuente de CO₂ durante la noche, donde la principal contribución es por Reco (Bao *et al.* 2022 y Chatterjee *et al.* 2021), En ausencia de sol, el NEE es 58 veces menor en promedio que los estudios previos (Bhattacharyya *et al.* 2013 y Yang *et al.* 2016), probablemente debido al incremento de HRc en el mismo periodo (Figura 26d).

En contraste con la tecnología del analizador portátil, la metodología EC que se usó en los Bhattacharyya *et al.* (2014), McMillan *et al.* (2007) y Zhang *et al.* (2023), donde emplean analizadores de gas NDIR de camino abierto como LI-7200, LI-7500 o EC-150. Estos son diseñados de manera específica para medir flujos de CO₂, vapor de agua y energía por debajo del dosel, por ende, su precio es excesivamente superior a la del analizador portátil. En este estudio se usó el sensor NDIR “MHZ19B” que difiere en aplicación, precisión y precio, Sin embargo, si se garantizan las condiciones óptimas de operación de los componentes del analizador, este tendría un alto potencial de precisión. Esto aumentaría considerablemente los coeficientes de variación obtenidos y representados en la Tabla 9. Por otro lado, NEE total durante la fase vegetativa ($-25,2 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) fue 1,4 veces menor que el mínimo en la fase reproductiva ($-35 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Así mismo, el NEE diurno máximo en la etapa de reproducción ($-13 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) fue 1.4 veces mayor que en la etapa vegetativa ($-9,4 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Esto concuerda con Yang *et al.* (2016) que obtuvieron que la absorción máxima en la fase vegetativa y de maduración fue 1,5 veces menor que en la fase reproductiva aproximadamente.

En la fase vegetativa, la asimilación de CO₂ es limitada porque la planta está en crecimiento (Figura 24a, b). En la etapa reproductiva, se observa el desarrollo completo y con ello, una máxima absorción. Ya en la etapa de maduración, las hojas senescentes caen y aportan materia orgánica al suelo. Además, se comenzó a drenar las parcelas para prepararlas para la fase de cosecha. Estos dos procesos acentúan la emisión de CO₂ hacia la atmosfera de manera progresiva hasta la cosecha (Figura 24c, d). Este comportamiento es similar a los resultados de Chen *et al.* (2015).



Figura 24: Crecimiento del arrozal en diferentes etapas del ciclo. (a y b) Macollamiento (82 y 89 DDS), (c) Estado de huso (111 DDS) y (d) Floración (126 DDS), respectivamente

4.2.1. NEE, R_{ECO} Y SU INTERACCIÓN CON VARIABLES AMBIENTALES

Los resultados de la prueba Anderson - Darling verificaron la no normalidad de los datos, a excepción de Ts. Luego, se analizó las correlaciones entre los factores ambientales con Reco y NEE. Los coeficientes cercanos a 1 y -1 indican una fuerte correlación positiva y negativa, respectivamente (Figura 25). El NEE se correlacionó de manera positiva y significativa con RHc (R = 0,66, p < 0,05) y Ts (R = 0,26, p < 0,05). En cambio, presentó correlación negativa significativa con Rn (R = -0,75, p < 0,05) y Tc (R = -0,69, p < 0,05). Por otro lado, Reco se asoció de manera positiva significativa con Tc (R = 0,7, p < 0,05) y Rn (R = 0,73, p < 0,05). Además, presentó correlación negativa significativa con RHc (R = -0,55, p < 0,05) y Ts (R = -0,4, p < 0,05).

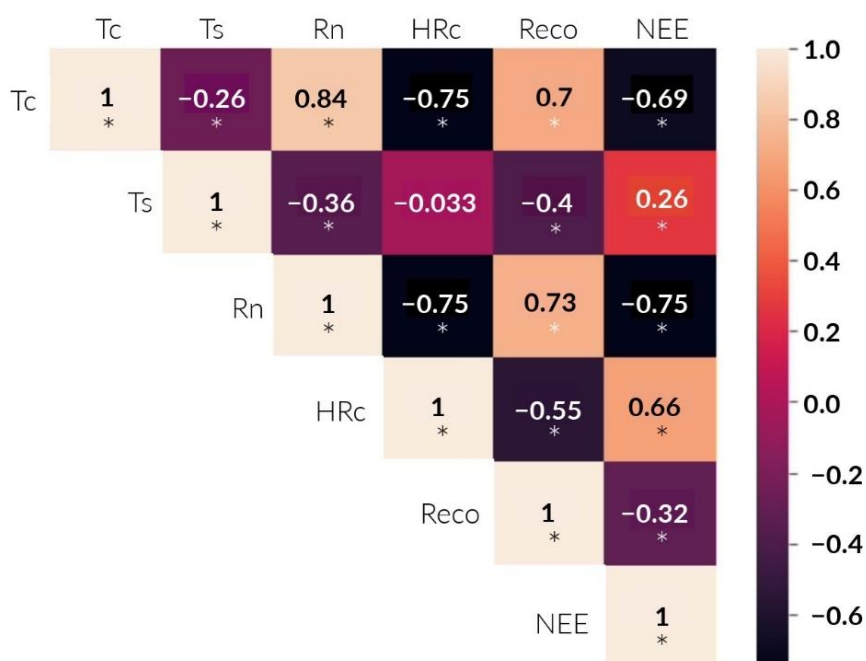


Figura 25: El mapa de calor de correlación De Spearman (R) entre NEE, Reco y variables ambientales. Los colores claros y oscuros indican correlaciones positivas y negativas, respectivamente. “*” indica una correlación significativa al nivel 0,05 (p < 0,05).

Los resultados de Reco tuvieron una correlación positiva fuerte con Tc y Rn. Cabe resaltar que estas variables se relacionan de manera positiva y fuerte (R = 0,84). De acuerdo con estudios previos, Ta es un factor importante en las emisiones de CO₂ de los ecosistemas agrícolas (Chen *et al.*, 2015 y Liu *et al.*, 2022), lo mismo ocurre con Rn. A medida que se intensifica Rn y Ta con el transcurso del día, la actividad radicular y microbiana emite CO₂ a la atmosfera. Siendo las 12:00 el momento en donde se da la máxima Reco. Sin embargo, la actividad fotosintética a esta hora es superior a Reco. A comparación con Bao *et al.* (2022)

se observó que Reco tuvo una débil correlación negativa con T_s , posiblemente influenciado por la textura del suelo, el tipo de ecosistema y el régimen hídrico. Por otro lado, la variación estacional de NEE se relacionó de manera negativa con T_c y R_n . R_n es la principal fuente de energía que tienen las plantas para realizar metabolismo. Entonces, la planta asimilará en mayor medida el CO_2 cuando más energía se disponga (Figura 26c). Estos resultados concuerdan con Liu *et al.* (2022).

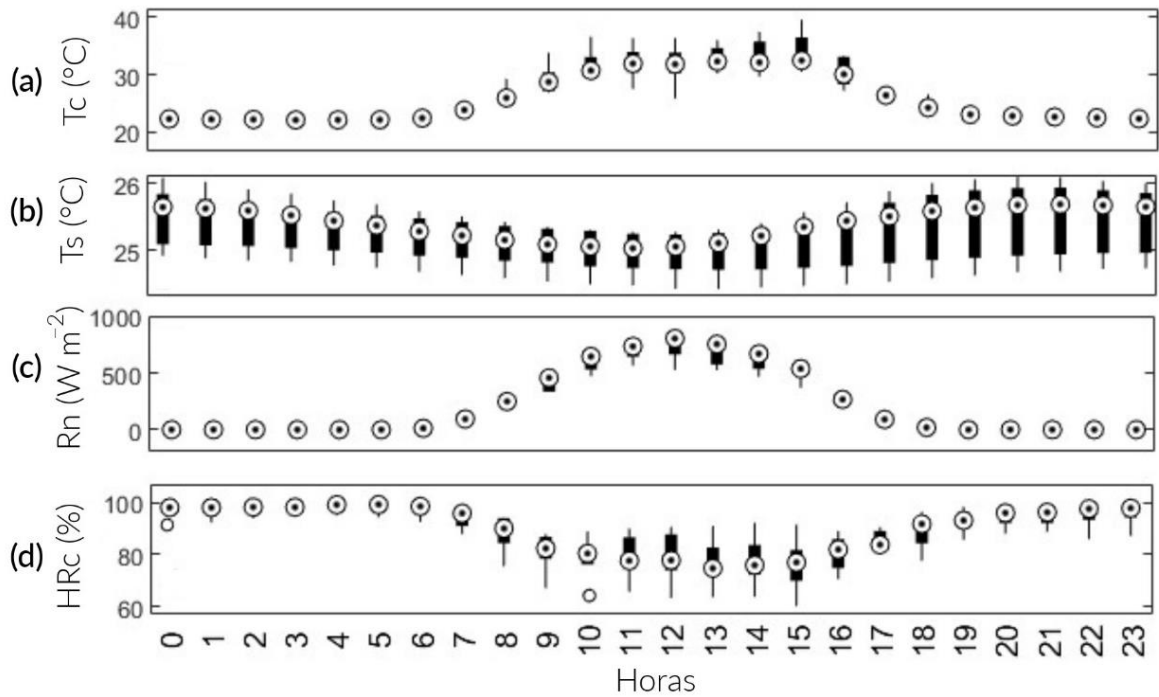


Figura 26: Variación diurna promedio de los principales factores ambientales. (a) T_c ; (b) T_s ; (c) R_n y (d) HRc.

Con respecto a T_c , los resultados concuerdan con Bhattacharyya *et al.* (2013) y Morales (2006). Encontraron una relación inversa entre la temperatura y la asimilación de CO_2 luego de sobrepasar $34\ ^\circ C$. Pues, la enzima rubisco, es esencial en la fijación de CO_2 y es susceptible al estrés térmico. Por otro lado, T_c superó este umbral a los 82 DDS, entre las 10:00 y 15:00 Posiblemente sea un factor por la cual el NEE es el máximo en toda la temporada. En adición, entre las 14:00 y 16:00 es donde se observa un incremento de 3,9 veces en la emisión de CO_2 (Figura 26a). Existe una débil correlación positiva entre NEE con T_s . Este a su vez presenta una débil y negativa correlación con T_c . Esto concuerda de manera parcial con Chen *et al.* (2015) ya que ellos si obtuvieron un alto efecto significativo entre T_a y T_s .

4.2.2. COMPARACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS

La información sobre las condiciones ambientales y de gestión de campo de otros autores están resumidas en la Tabla 7. Ya que, influyen en la absorción de CO₂ (Chen *et al.*, 2015 y Li *et al.*, 2023).

Tabla 8. Principales características ambientales en los estudios previos de NEE y esta investigación.

Sitio	Clima (Köppen-Geiger, 1900)	Gestión de campo	Textura de Suelo	Referencia
Cuttack, India	Sabana tropical (Aw)	Riego por inundación. Profundidad de agua: 8 cm	Franco arcillo arenosa	Chatterjee <i>et al.</i> (2020)
Delhi, India	Semiárido cálido (Bsh)	Encharcado convencional	Franca	Kumar <i>et al.</i> (2021)
Cuttack, India	Sabana tropical (Aw)	Riego por inundación. Profundidad de agua: 7 - 10 cm	Franco arcillo arenosa	Neogi <i>et al.</i> (2021)
Lima, Perú	Desértico cálido (Bwh)	Encharcado convencional. Profundidad de agua: 5 cm	Franca	-

Los resultados representados en la Figura 27 y en los anexos 1 – 4 indican una menor capacidad de absorción de CO₂ que Chatterjee *et al.* (2020), Kumar *et al.* (2021) y Neogi *et al.* (2021), posiblemente debido a las condiciones climáticas. El estudio estuvo bajo condiciones de un clima desértico cálido (Bwh) debido a la presencia permanente del anticiclón del pacífico sur en el norte de Chile. Por otro lado, Chatterjee *et al.* (2020) y Neogi *et al.* (2021) realizaron sus estudios en el ICAR - National Rice Research Institute (NRRI), en India, y registraron condiciones climáticas propias del tipo sabana tropical (Aw). Además, los estudios de Kumar *et al.* (2021), se realizaron en el Indian Agricultural Research Institute (IARI), en Dehli, India, y estuvieron bajo condiciones de clima semiárido cálido (Bsh).

Con respecto a la pp durante la temporada de arroz, se registró un total de 13,4 mm. A pesar de la influencia del ciclón “Yaku”, que coincidió con 111 y 126 DDS (Figura 14d). A comparación con Chatterjee *et al.* (2020) y Neogi *et al.* (2021), cuya pp media anual fue de 1500 mm donde el 75 y 80 % ocurre entre los meses de junio a septiembre. Además, Kumar *et al.* (2021) registraron 1198 mm durante la temporada de kharif para el cultivo de arroz, donde la mayor parte de las lluvias ocurrieron de julio a septiembre debido al Monzón del suroeste.

En relación con Tc media, oscilo entre 21,82 y 33,9 °C. Por otro lado, Ts media fluctuó entre 24,95 y 25,51 °C. El estudio se realizó en los meses de febrero a mayo durante la temporada de verano, donde también se tuvo la influencia de la fase fría de El Niño Southern Oscilation

(ENSO). Chatterjee *et al.* (2020) registraron temperaturas máximas y mínimas medias anuales de 39,2 y 22,5 °C. Kumar *et al.* (2021) registraron Ta y Ts entre 31,8 a 38,2 °C y 27,7 a 28,9 °C, respectivamente. Neogi *et al.* (2021) registraron un aumento progresivo de la temperatura conforme el ciclo vegetativo del arroz continuaba. Desde la etapa vegetativa hasta la cosecha, las temperaturas medias fueron de 23,6 a 33,5 °C, respectivamente.

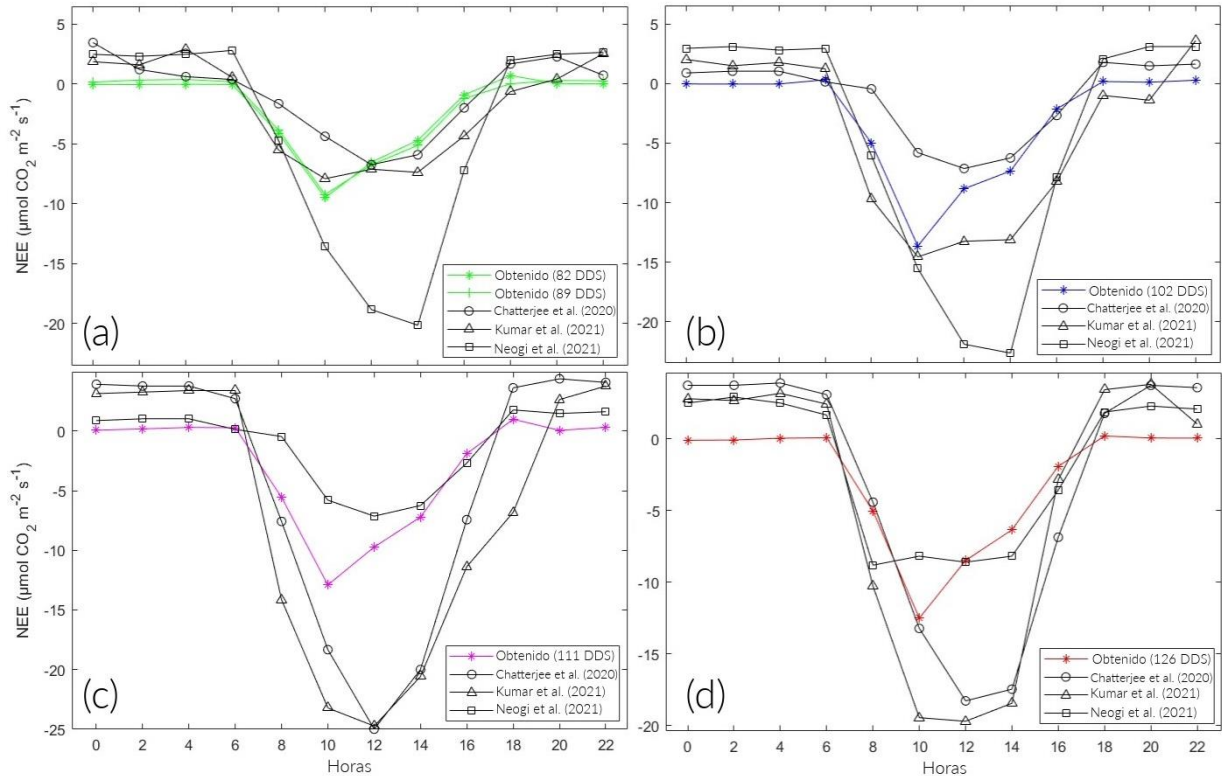


Figura 27: Comparación de la variación diurna del NEE en diferentes etapas del ciclo fenológico del arroz. (a) Macollamiento, (b) Primordio floral, (c) Estado de huso y (d) Floración, respectivamente.

Se observaron diferencias en los métodos de riego. El estudio tuvo como máximo una lámina de agua de 5 cm durante todo el periodo de estudio. Chatterjee *et al.* (2020) utilizaron un régimen hídrico superior en tres unidades. Kumar *et al.* (2021) regaron sus cultivos solo cuando el contenido de humedad caía por debajo del nivel de saturación. A su vez, el régimen de riego de Neogi *et al.* (2021) resultó en una lámina de 7 – 10 cm. Según Yang *et al.* (2017) el NEE es sensible a las estrategias de gestión del campo. Siendo uno de los factores más importantes, la gestión del agua. Además, las emisiones de CO₂ del suelo disminuyen cuando se inunda con agua. Ya que esto reduce la difusividad de la capa superior del suelo (Saito *et al.*, 2005). Estas condiciones anóxicas merman actividad biológica del suelo, como se mencionó en Bao *et al.* (2022) y Liu *et al.* (2022).

4.3.RENDIMIENTO DEL PROTOTIPO MULTISENSOR

Se aplicó prueba Anderson Darling a los flujos de emisión de GEI para el análisis cromatográfico y lecturas del prototipo multisensor, así como, el NEE y variables meteorológicas. Para el flujo de GEI, los resultados mostraron la no normalidad de los flujos de N₂O Y CO₂ monitoreados por el prototipo multisensor; el resto de variables mostraron ser paramétricas. Por otro lado, en el cálculo del NEE y variables meteorológicas, los datos de Ts mostraron normalidad, el resto de variables resultaron ser no paramétricas.

La Tabla 8 muestra los resultados de la prueba U de Mann-Whitney que verifica la diferencia significativa de los flujos medidos por ambos métodos. Se evidenció que existe diferencia significativa ($p < 0,05$) para los flujos de CH₄ y N₂O. Sin embargo, los flujos de CO₂ no presentaron diferencia significativa. Esto se debe a la diferencia en las tecnologías de los sensores, los sensores MQ son sensores electroquímicos, en cambio, el sensor MHZ19B presenta tecnología NDIR que le permite detectar CO₂. Esto también se contrasta con los precios de ambos en el mercado, los primeros fueron fácilmente adquiribles en los mercados locales a 8.00 soles, en cambio, el segundo se tuvo que comprar por internet a un precio de 180,00 soles. En adición, los sensores MQ - 9 y MQ - 135 no son específicos para CH₄ y N₂O, sino que poseen un amplio espectro de detección, como, por ejemplo, gases combustibles y compuestos nitrogenados, respectivamente. Por ende, los resultados obtenidos no fueron similares con los mostrados por la cromatografía. Además, los flujos de GEI se vieron afectados por la falta de calentamiento de los sensores. Pues estos solo eran precalentados a primera hora, durante 20 o 30 minutos antes del monitoreo mediante los dos métodos de medición en simultaneo, cuando lo recomendable era 1 o 2 días. Esto presento un inconveniente, ya que en los estudios de Frisancho, (2020), se sugirió que la cámara estática solo debe estar acoplada a la base en las parcelas al momento del monitoreo. Ya que la presencia permanente de la cámara estática generaba un microclima diferente al resto de plantas de arroz en la misma parcela. Esto no ocurrió en los días de monitoreo de NEE, pues los prototipos eran precalentados con anticipación, además, se le hizo una conexión a la toma eléctrica para que sea más fácil el trabajo de monitoreo.

Tabla 9. Prueba U de Mann-Whitney para los valores obtenidos comparados con el análisis cromatográfico.

Prototipo multisensor	Análisis cromatográfico		
	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
CH ₄	0,001309	–	–
N ₂ O	–	0,0013149	–
CO ₂	–	–	0,5451985**

“**” indica que no hay diferencia significativa al nivel 0,05 ($p \geq 0,05$).

Por otro lado, la Tabla 9 muestra los resultados obtenidos por la prueba U de Mann-Whitney, donde se comparó los flujos de NEE con las experiencias previas. Se observó que no presentó diferencias significativas con los estudios previos en todas las etapas fenológicas ($p > 0,05$).

Tabla 10. Prueba U de Mann-Whitney para los valores obtenidos comparados con Chatterjee *et al.*, (2020); Kumar *et al.*, (2021) y Neogi *et al.*, (2021).

Referencias	Macollamiento		Primordio floral	Estado de huso	Floración
	82 DDS	89 DDS	102 DDS	111 DDS	126 DDS
Chatterjee <i>et al.</i> (2020)	96**	98**	99**	88**	90**
Kumar <i>et al.</i> (2021)	83**	85**	75**	76**	89**
Neogi <i>et al.</i> (2021)	87**	88**	89**	96**	94**

“**” indica que no hay diferencia significativa al nivel 0,05 ($p \geq 0,05$).

De manera particular, el sensor MHZ19B posee un tiempo de respuesta menor a 60 s, por lo que se programó el analizador con un tiempo de respuesta de un minuto para realizar un mejor análisis. En cambio, los analizadores de camino abierto como LI – 7500A o LI – 7550 poseen tiempos de respuesta de 0,1, 0,05 y 0,0025 s. En complemento, la sensibilidad de los sensores también es un factor importante a considerar, pues el MHZ19B posee una sensibilidad de ± 50 ppm a comparación de LI – 7500A con $\pm 0,11$ ppm a 0,05 s de respuesta. Se realizó un análisis de regresión entre los flujos de NEE calculados a partir de datos recopilados con el analizador portátil y los flujos de NEE calculados mediante EC por Chatterjee *et al.* (2020); Kumar *et al.* (2021) y Neogi *et al.* (2021) (Figure 12). Los coeficientes de determinación presentan valores de 0,661, 0,7873 y 0,5943, respectivamente (Figura 28). Estos valores pueden mejorar si se toma en consideración un método de calibración adicional y en la mejora de las condiciones de Tc y HRc.

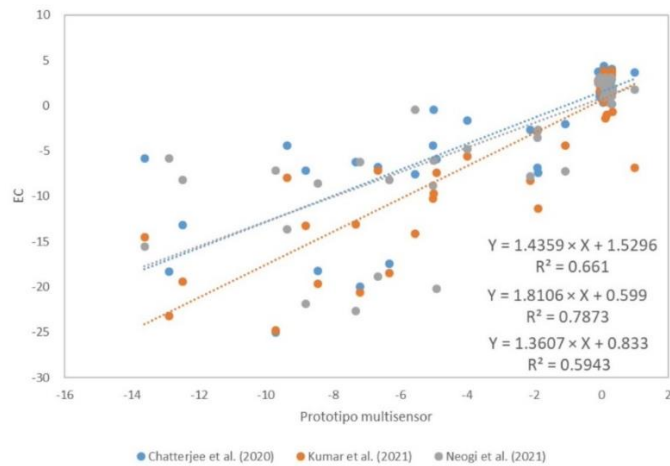


Figura 28: Coeficientes de determinación entre los valores de NEE ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) calculados con el analizador portátil y EC por Chatterjee *et al.*, (2020); Kumar *et al.*, (2021) y Neogi *et al.*, (2021); respectivamente.

Con respecto al prototipo, ocurrieron fallas de conexión entre la batería portátil y el prototipo multisensor. La batería portátil presentaba un puerto USB hembra inestable y al momento de conectar el cable USB macho, la conexión presento fallas. Por ende, al momento de la extracción de GEI, cualquier movimiento brusco que realizaba el operario ocasionaba que se apague el prototipo. En adición, ocurrieron inconvenientes con el módulo de memoria micro SD. Las condiciones ambientales dentro de la cámara estática, el transporte y la manipulación constante dañó los componentes del módulo de memoria. Ocurrido esto, al momento de encender el prototipo el código madre se interrumpió por no tener respuesta de la lectura de memoria microSD. Por lo tanto, en algunas fechas programadas para el monitoreo de GEI (59, 74 y 84 DDS), no se obtuvieron resultados por parte del prototipo, ya que no almacenaba los datos en la memoria microSD.

En términos económicos, el análisis cromatográfico de cada vial costó seis dólares. Y en total, para las 3 repeticiones y 10 fechas costaron 720 dólares. A comparación del costo de ensamblaje del analizador el cual fue de 131.4 dólares. Esta diferencia de 13 veces se plasma en la diferencia significativa que presentan cada método (Tabla 9), tanto para el sensor de CH_4 y N_2O , cuyos valores son ínfimos. Esto no ocurre con el sensor de CO_2 que si bien no presenta diferencia significativa con los resultados cromatograficos (Tabla 9), este valor podría incrementarse siguiendo las recomendaciones mencionadas.

El prototipo multisensor no funcionó de manera óptima debido a los motivos descritos anteriormente. Se optimizaría su rendimiento si se reemplaza los accesorios y sensores por unos de mayor calidad. Así como también, su disposición junto con la cámara estática. Es

importante resaltar que este tipo de tecnologías aplicada al monitoreo de GEI en la agricultura es nuevo y todo tipo de investigación que genere información en este rubro es de vital importancia para cumplir con los requerimientos de los ODS en la agricultura peruana.

V. CONCLUSIONES

1. Se diseñó e implementó una cámara estática con un analizador portátil de CO₂. Una alternativa económica, simple y efectiva a los métodos tradicionales de monitoreo de GEI. Una herramienta útil para la toma de decisiones sobre la gestión de recursos en la práctica agrícola en Perú.
2. Los flujos de CH₄ y N₂O calculados por el prototipo multisensor tuvieron diferencias significativas con respecto a los flujos obtenidos por el método de las cámaras estáticas. Los valores de CH₄ fueron subestimados, mientras que los de N₂O fueron sobreestimados en todas las fechas de monitoreo.
3. Las parcelas de arroz actuaron como sumidero de CO₂ de 6:00 a.m. a 18:00 p.m., y como fuente de CO₂ durante el periodo restante. El NEE mínimo a los 82, 89, 102, 111 Y 126 DDS fue de -9,51, -9,25, -13,63, -12,9 y -12,5 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y el NEE máximo para las mismas fechas fue de 0,68, 0,36, 0,32, 1 y 0,22 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. El NEE total estacional fue de -25,2 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y -35 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para las etapas de crecimiento y reproducción, respectivamente. Esto es, una diferencia de 1,4 veces entre las etapas mencionadas. Por otro lado, NEE fue influenciado principalmente por R_n (R = -0,75), T_c (R = -0,69) y RH_c (R = 0,66). El NEE fue negativo durante todo el periodo de crecimiento del arroz. Esto demostró que el arrozal actuó como sumidero neto de CO₂. Además, las diferencias en la absorción de CO₂ se atribuyen principalmente al tipo de cultivo, gestión de riego, condiciones climáticas y de suelo.
4. El análisis estadístico demostró que los flujos de CH₄ y N₂O presentan diferencia significativa y no son fiables a comparación del resultado cromatográfico. Por otra parte, los flujos de CO₂ y NEE comparados con los resultados obtenidos por análisis cromatográfico y covarianza de remolinos (EC) realizado por los estudios previos, no presentan diferencia significativa. Por lo anterior, se sugiere que el analizador portátil podría ser una alternativa para el monitoreo de CO₂. Aunque, hace falta mayor investigación para considerarlo como un método de referencia.

VI. RECOMENDACIONES

1. Emplear sensores NDIR de nueva generación como SenseAir S8 para CO₂ y SJH para CH₄ que han salido en el mercado chino, por lo que, es conveniente importarlos para mejorar las lecturas. Además, mejorar el sistema de energía mediante la incorporación de una batería interna, para evitar la conexión con una batería externa.
2. Aumentar el número de fechas de monitoreo, así como el número de pruebas con otros tipos de cobertura. Esto hará que se evite el sesgo por falta de información.
3. Implementar un mecanismo que permita el retiro automático de la tapa de la cabina para que este sea independiente de un operario. Esto permitirá que se reduzcan los errores por factor humano.
4. Ubicar el prototipo multisensor fuera de la cámara, pues las condiciones de T_c y HR_c han influido significativamente en la lectura del prototipo analizador.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Agence France-Presse [@AFPespanol]. (2021, octubre 25). *Clasificación por sector de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo en 2018 #AFP #Infografía* <https://t.co/gKFvUmhmb> [Tweet]. Twitter.
<https://twitter.com/AFPespanol/status/1452646630814068743>
- Arduino Online Shop. (2023). *Arduino Due*. Recuperado el 10 de enero de 2024, de <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-due>
- 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>
- Bandumula, N. (2018). Rice Production in Asia: Key to Global Food Security. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 88(4), 1323–1328. <https://doi.org/10.1007/s40011-017-0867-7>
- Bao, Y., Liu, T., Duan, L., Tong, X., Zhang, Y., Wang, G., & Singh, V. P. (2022). Variations and controlling factors of carbon dioxide and methane fluxes in a meadow-rice ecosystem in a semi-arid region. *Catena*, 215, 106317. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106317>
- Betancourt-Portela, J. M., Parra, J. P., & Villamil, C. (2013). Emisión de metano y óxido nitroso de los sedimentos de manglar de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, 42(1), 131-152. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2013.42.1.64>
- Bhattacharyya, P., Neogi, S., Roy, K. S., Dash, P. K., Nayak, A. K., & Mohapatra, T. (2014). Tropical low land rice ecosystem is a net carbon sink. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 189, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.013>

- Bhattacharyya, P., Neogi, S., Roy, K. S., Dash, P. K., Tripathi, R., & Rao, K. S. (2013). Net ecosystem CO₂ exchange and carbon cycling in tropical lowland flooded rice ecosystem. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 95, 133-144.
- Capurro, M. C., Tarlera, S., Irisarri, P., Cantou, G., Riccetto, S., Fernández, A., & Roel, A. (2015). Cuantificación de emisiones de metano y óxido nitroso bajo dos manejos del riego contrastantes en el cultivo de arroz. *Montevideo: INIA (INIA Serie Técnica, 220*, 38.
- Change, N. G. C. (2023). *Carbon Dioxide Concentration | NASA Global Climate Change*. Climate Change: Vital Signs of the Planet. Recuperado de <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide>
- Chatterjee, D., Swain, C. K., Chatterjee, S., Bhattacharyya, P., Tripathi, R., Lal, B., Gautam, P., Shahid, M., Dash, P. K., Dhal, B., & Nayak, A. K. (2021). Is the energy balance in a tropical lowland rice paddy perfectly closed? *Atmósfera*, 34(1), Article 1. <https://doi.org/10.20937/ATM.52734>
- Chatterjee, S., Swain, C. K., Nayak, A. K., Chatterjee, D., Bhattacharyya, P., Mahapatra, S. S., Debnath, M., Tripathi, R., Guru, P. K., & Dhal, B. (2020). Partitioning of eddy covariance-measured net ecosystem exchange of CO₂ in tropical lowland paddy. *Paddy and Water Environment*, 18(4), 623–636. <https://doi.org/10.1007/s10333-020-00806-7>
- Chen, C., Li, D., Gao, Z., Tang, J., Guo, X., Wang, L., & Wan, B. (2015). Seasonal and interannual variations of carbon exchange over a rice-wheat rotation system on the North China Plain. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(10), 1365–1380. <https://doi.org/10.1007/s00376-015-4253-1>
- Coulby, G., Clear, A. K., Jones, O., & Godfrey, A. (2021). Low-cost, multimodal environmental monitoring based on the Internet of Things. *Building and Environment*, 203, 108014. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108014>
- Fahad, S., Adnan, M., Noor, M., Arif, M., Alam, M., Khan, I. A., Ullah, H., Wahid, F., Mian, I. A., Jamal, Y., Basir, A., Hassan, S., Saud, S., Amanullah, Riaz, M., Wu, C., Khan, M. A., & Wang, D. (2019). Chapter 1-Major Constraints for Global Rice Production. En M. Hasanuzzaman, M. Fujita, K. Nahar, & J. K. Biswas (Eds.), *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance* (pp. 1–22). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814332-2.00001-0>

- FAOSTAT. (2023). Recuperado el 29 de diciembre de 2023, de <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Frisancho Larico, G. R. (2020). *Efecto del riego por inundación y secas en la emisión de gases en el cultivo de arroz (Oryza sativa L.)*, UNALM. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4370>
- Gangopadhyay, S., Chowdhuri, I., Das, N., Pal, S. C., & Mandal, S. (2023). The effects of no-tillage and conventional tillage on greenhouse gas emissions from paddy fields with various rice varieties. *Soil and Tillage Research*, 232, 105772. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105772>
- Gao, D., Yao, J., Yu, S., Ma, Y., Li, L., & Gao, Z. (2023). Eddy Covariance CO₂ Flux Gap Filling for Long Data Gaps: A Novel Framework Based on Machine Learning and Time Series Decomposition. *Remote Sensing*, 15(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/rs15102695>
- Gao, H., Liu, Q., Yan, C., Wu, Q., Gong, D., He, W., Liu, H., Wang, J., & Mei, X. (2023). Mitigation of greenhouse gas emissions and improved yield by plastic mulching in rice production. *Science of The Total Environment*, 880, 162984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162984>
- Garcés, G., & Medina, J. (2018). *La Fisiología Del Cultivo Del Arroz en El Programa AMTEC* (6-19). FEDEARROZ. <https://www.scribd.com/document/391139365/La-Fisiologia-Del-Cultivo-Del-Arroz-en-El-Programa-AMTEC>
- Guillén-García, C. E., Dávila-Albarrán, M. J., Guillén-García, L. G., & Guillén-Pérez, L. A. (2021). Características espectrales del arroz (*Oryza sativa L.*) bajo condiciones de acamado por paja rugosa (*Ischaemum rugosum Salisb.*). *Revista Geográfica de América Central*, 1(66), 385–406.
- Guo, D., Parehkar, A., Ryu, D., Wang, Q. J., & Western, A. W. (2022). Parsimonious Gap-Filling Models for Sub-Daily Actual Evapotranspiration Observations from Eddy-Covariance Systems. *Remote Sensing*, 14(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/rs14051286>
- Gupta, K., Kumar, R., Baruah, K. K., Hazarika, S., Karmakar, S., & Bordoloi, N. (2021). Greenhouse gas emission from rice fields: A review from Indian context.

- Environmental Science and Pollution Research*, 28(24), 30551–30572.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-13935-1>
- Habib, M. A., Islam, S. M. M., Haque, M. A., Hassan, L., Ali, M. 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), Article 2. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020041>
- Hakim, I. T., Budianto, B., Immanuel, G. S., Rakhman, A., Kinasih, S. A. K. W., & Boer, R. (2021). Development of air quality mobile tools for observation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 893(1), 012071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012071>
- Hidalgo Sánchez, M. E. (2020). *Evapotranspiración e intercambio neto del ecosistema en un bosque bajo manejo para producción maderable* (Master's thesis). <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/4290>
- Mena Roa, M. (2023). Statista Daily Data. *Infografía: Diez países causan casi el 70% de las emisiones mundiales de CO₂*. Recuperado de: <https://es.statista.com/grafico/28687/paises-con-el-mayor-porcentaje-de-emisiones-mundiales-de-co%25E2%2582%2582>
- INGEI 2019 Archivos. (2023). *Infocarbono*. Recuperado de: <https://infocarbono.minam.gob.pe/annios-inventarios-nacionales-gei/ingei-2019/>
- INTEC, R. A. del. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, 37(2), Article 2. <https://doi.org/10.22206/cys.2012.v37i2.pp227-240>
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Klosterhalfen, A., Chi, J., Kljun, N., Lindroth, A., Laudon, H., Nilsson, M. B., & Peichl, M. (2023). Two-level eddy covariance measurements reduce bias in land-atmosphere exchange estimates over a heterogeneous boreal forest landscape. *Agricultural and Forest Meteorology*, 339, 109523. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109523>

- Kumar, A., Bhatia, A., Sehgal, V. K., Tomer, R., Jain, N., & Pathak, H. (2021). Net Ecosystem Exchange of Carbon Dioxide in Rice-Spring Wheat System of Northwestern Indo-Gangetic Plains. *Land*, *10*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/land10070701>
- Kumar, A., Nayak, A. K., Das, B. S., Panigrahi, N., Dasgupta, P., Mohanty, S., Kumar, U., Panneerselvam, P., & Pathak, H. (2019). Effects of water deficit stress on agronomic and physiological responses of rice and greenhouse gas emission from rice soil under elevated atmospheric CO₂. *Science of The Total Environment*, *650*, 2032–2050. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.332>
- Kumar, M. C., Ali, S., Lakshmi, S. P., Kullayappa, R. G., & Alam, T. K. (2021). Low-Cost IoT Enabled Embedded System for Measurement of Environmental Pollutants. *Nature Environment and Pollution Technology*, *20*(4), 1725-1732.
- Li, J., Xue, Z., Li, Y., Bo, G., Shen, F., Gao, X., Zhang, J., & Tan, T. (2023). Real-Time Measurement of Atmospheric CO₂, CH₄ and N₂O above Rice Fields Based on Laser Heterodyne Radiometers (LHR). *Agronomy*, *13*(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020373>
- 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, C., Wu, Z., Hu, Z., Yin, N., Islam, A. R. M. T., & Wei, Z. (2022). Characteristics and influencing factors of carbon fluxes in winter wheat fields under elevated CO₂ concentration. *Environmental Pollution*, *307*, 119480. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119480>
- Loaiza, S., Verchot, L., Valencia, D., Guzmán, P., Amezquita, 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>
- Mariete. (2020, diciembre 27). La biblia del sensor de CO₂ MH-Z19B. *eMariete*. <https://emariete.com/sensor-co2-mh-z19b/>

- McMillan, A. M. S., Goulden, M. L., & Tyler, S. C. (2007). Stoichiometry of CH₄ and CO₂ flux in a California rice paddy. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G1). <https://doi.org/10.1029/2006JG000198>
- Mishra, A. K., Pede, V. O., Arouna, A., Labarta, R., Andrade, R., Veettil, P. C., Bhandari, H., Laborte, A. G., Balie, J., & Bouman, B. (2022). Helping feed the world with rice innovations: CGIAR research adoption and socioeconomic impact on farmers. *Global Food Security*, 33, 100628. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100628>
- Morales, D. (2006). Efecto de altas temperaturas en algunas variables del crecimiento y el intercambio gaseoso en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. CV. AMALIA). *Cultivos tropicales*, 27(1), 45-48.
- García, M. M. (2022). *Prácticas agrarias sostenibles en la agricultura mediterránea para la reducción de la erosión, el cambio climático y la pérdida de biodiversidad* (Doctoral dissertation, Universidad de Córdoba (ESP)). <http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/24505>
- Nations, U. (2024). *What Is Climate Change?* United Nations; United Nations. Recuperado el 3 de enero de 2024, de <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>
- Neogi, S., Bhattacharyya, P., & Nayak, A. K. (2021). Characterization of carbon dioxide fluxes in tropical lowland flooded rice ecology. *Paddy and Water Environment*, 19(3), 539–552. <https://doi.org/10.1007/s10333-021-00853-8>
- Oo, A. Z., Yamamoto, A., Ono, K., Umamageswari, C., Mano, M., Vanitha, K., Elayakumar, P., Matsuura, S., Bama, K. S., Raju, M., Inubushi, K., Sudo, S., Saitoh, N., Hayashida, S., Ravi, V., & Ambethgar, V. (2023). Ecosystem carbon dioxide exchange and water use efficiency in a triple-cropping rice paddy in Southern India: A two-year field observation. *Science of The Total Environment*, 854, 158541. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158541>
- Orozco Patiño, F. H. (1999). *Biología del nitrógeno*. Facultad de ciencias. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7317>
- Paredes C., M., & Becerra V., V. (2015). *Producción de arroz: Buenas prácticas agrícolas (BPA)*. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/7815>

- Paredes C., M., Becerra V., V., & Donoso Ñ., G. (2021). *100 años del cultivo del arroz en Chile en un contexto internacional 1920-2020. Tomo II*. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/68052>
- Pihlatie, M. K., Christiansen, J. R., Aaltonen, H., Korhonen, J. F. J., Nordbo, A., Rasilo, T., Benanti, G., Giebels, M., Helmy, M., Sheehy, J., Jones, S., Juszczak, R., Klefoth, R., Lobo-do-Vale, R., Rosa, A. P., Schreiber, P., Serça, D., Vicca, S., Wolf, B., & Pumpanen, J. (2013). Comparison of static chambers to measure CH₄ emissions from soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171–172, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.008>
- Puspasari, F.-, Fahrurrozi, I.-, Satya, T. P., Setyawan, G.-, Fauzan, M. R. A., & Admoko, E. M. D. (2019). Sensor Ultrasonik HCSR04 Berbasis Arduino Due Untuk Sistem Monitoring Ketinggian. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v15i2.4393>
- 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), Article 11. <https://doi.org/10.3390/s22114141>
- Voz de América. (2015). *Los gases de efecto invernadero vuelven a batir un récord*. Recuperado de <https://www.vozdeamerica.com/a/cambio-climatico-gases-efecto-invernadero-baten-recordf/3049879.html>
- Saito, M., Miyata, A., Nagai, H., & Yamada, T. (2005). Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 135(1), 93–109. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.10.007>
- Sanhueza, E. (1982). The role of the atmosphere in nitrogen cycling. En G. P. Robertson, R. Herrera, & T. Rosswall (Eds.), *Nitrogen Cycling in Ecosystems of Latin America and the Caribbean* (pp. 61–71). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-7639-9_5
- Seo, J.-W., Roh, W.-T., Lee, S.-R., Jeong, R.-H., & Kim, W. (2020). Drowsiness detection and prevention with RaspberryPi. *Proceedings of the Korea Information Processing Society Conference*, 220–223. <https://doi.org/10.3745/PKIPS.y2020m11a.220>

- Serrano Ortiz, P. (2023). *Intercambios de CO₂ entre atmósfera y ecosistemas kársticos: Aplicabilidad de las técnicas comúnmente empleadas*. Universidad de Granada. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/82184>
- Subbarao, G. V., Ito, O., Sahrawat, K. L., Berry, W. L., Nakahara, K., Ishikawa, T., Watanabe, T., Suenaga, K., Rondon, M., & Rao, I. M. (2006). Scope and Strategies for Regulation of Nitrification in Agricultural Systems—Challenges and Opportunities. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25(4), 303–335. <https://doi.org/10.1080/07352680600794232>
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers—Global Warming of 1.5 °C. Recuperado el 30 de diciembre de 2023, de <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>
- Unit electronics. (2024). MQ-9 Detector de Gas de Combustible. *UNIT Electronics*. Recuperado el 10 de enero de 2024, de <https://uelectronics.com/producto/mq-9-detector-de-gas-de-combustible/>
- Unit electronics. (2023). MQ-135 Detector de Calidad de Aire. *UNIT Electronics*. Recuperado el 10 de enero de 2024, de <https://uelectronics.com/producto/mq-135-modulo-detector-de-calidad-de-aire/>
- US EPA. (2021). *Emisiones de dióxido de carbono* [Data and Tools]. Recuperado el 1 de enero de 2024, de <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- Vallejo, M. M., C. C. R. B., & Castilla, L. A. (2008). Evaluación de la asociación bacterias fijadoras de nitrógeno—Líneas interespecíficas de arroz-nitrógeno, en Typic haplustalf. Ibagué, Colombia. *Acta Agronómica*, 57(1), 43–49.
- Yang, S., Liu, X., Liu, X., & Xu, J. (2017). Effect of water management on soil respiration and NEE of paddy fields in Southeast China. *Paddy and Water Environment*, 15(4), 787–796. <https://doi.org/10.1007/s10333-017-0591-1>
- Yang, S., Sun, X., Ding, J., Jiang, Z., Liu, X., & Xu, J. (2020). Effect of biochar addition on CO₂ exchange in paddy fields under water-saving irrigation in Southeast China. *Journal of Environmental Management*, 271, 111029. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111029>
- Yang, S., Xu, J., Liu, X., Zhang, J., & Wang, Y. (2016). Variations of carbon dioxide exchange in paddy field ecosystem under water-saving irrigation in Southeast

- China. *Agricultural Water Management*, 166, 42–52.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.015>
- Zhang, K., Wang, Y., Mamtimin, A., Yongqiang, L., & Gao, J. (2023). *Carbon dioxide fluxes over grassland ecosystems in the Middle Tianshan region of China with eddy covariance method*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2794283/v1>
- Zhao, Y., Wu, J., Guo, C., Wu, H., Wang, J., Zhang, Q., Xiao, Y., & Qiu, R. (2023). Comparing the eddy covariance and gradient methods for measuring water and heat fluxes in paddy fields. *Agricultural Water Management*, 284, 108340.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108340>
- Zou, J., Huang, Y., Zheng, X., Wang, Y., & Chen, Y. (2004). Static opaque chamber-based technique for determination of net exchange of CO₂ between terrestrial ecosystem and atmosphere. *Chinese Science Bulletin*, 49(4), 381–388.
<https://doi.org/10.1007/BF02900322>

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Comparación de la variación diurna de NEE ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en macollamiento.

Hora	PPFD Yang <i>et al.</i> (2016)	DDS		Referencias		
		82	89	Chatterjee <i>et al.</i> , (2020)	Kumar <i>et al.</i> , (2021)	Neogi <i>et al.</i> , (2021)
0	10	$-0,061 \pm 0,09$	$0,143 \pm 0,25$	3,439	1,84	2,459
2	10	$-0,069 \pm 0,05$	$0,309 \pm 0,29$	1,186	1,58	2,295
4	10	$-0,041 \pm 0,12$	$0,361 \pm 0,39$	0,593	2,91	2,459
6	10	$-0,064 \pm 0,03$	$0,171 \pm 0,21$	0,356	0,53	2,787
8	200	$-4,148 \pm 0,17$	$-3,860 \pm 0,54$	-1,660	-5,55	-4,754
10	600	$-9,511 \pm 0,08$	$-9,245 \pm 0,54$	-4,387	-7,93	-13,607
12	400	$-6,555 \pm 0,53$	$-6,777 \pm 0,91$	-6,759	-7,14	-18,852
14	300	$-4,710 \pm 0,9$	$-5,141 \pm 0,63$	-5,929	-7,40	-20,164
16	100	$-0,928 \pm 0,24$	$-1,233 \pm 0,77$	-2,016	-4,36	-7,213
18	10	$0,686 \pm 0,89$	-	1,660	-0,66	1,967
20	10	$0,015 \pm 0,18$	$0,280 \pm 0,28$	2,253	0,40	2,459
22	10	$-0,014 \pm 0,04$	$0,247 \pm 0,21$	0,711	2,51	2,623

PPFD = Densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Anexo 2. Comparación de la variación diurna de NEE ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en primordio floral.

Hora	PPFD Yang <i>et al.</i> (2016)	DDS		Referencias		
		102	Chatterjee <i>et al.</i> , (2020)	Kumar <i>et al.</i> , (2021)	Neogi <i>et al.</i> , (2021)	
0	10	$-0,034 \pm 0,17$	0,891	2,03	2,956	
2	10	$-0,041 \pm 0,05$	1,040	1,50	3,103	
4	10	$-0,036 \pm 0,04$	1,040	1,76	2,808	
6	10	$0,318 \pm 0,3$	0,149	1,24	2,956	
8	200	$-4,997 \pm 0,59$	-0,446	-9,68	-6,059	
10	600	$-13,626 \pm 0,54$	-5,792	-14,55	-15,517	
12	400	$-8,829 \pm 1,29$	-7,129	-13,23	-21,872	
14	300	$-7,336 \pm 0,48$	-6,238	-13,10	-22,611	
16	100	$-2,123 \pm 0,73$	-2,673	-8,23	-7,833	
18	10	$0,171 \pm 0,21$	1,782	-1,00	2,069	
20	10	$0,110 \pm 0,09$	1,485	-1,39	3,103	
22	10	$0,282 \pm 0,24$	1,634	3,60	3,103	

PPFD = Densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) mayor referencia de la data

Anexo 3. Comparación de la variación diurna de NEE ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en estado de huso.

Hora	PPFD Yang <i>et al.</i> (2016)	DDS		Referencias	
		111	Chatterjee <i>et al.</i> , (2020)	Kumar <i>et al.</i> , (2021)	Neogi <i>et al.</i> , (2021)
0	10	0,081 ± 0,19	3,939	3,15	0,891
2	10	0,194 ± 0,25	3,788	3,28	1,040
4	10	0,313 ± 0,47	3,788	3,41	1,040
6	10	0,290 ± 0,47	2,727	3,41	0,149
8	200	-5,550 ± 0,36	-7,576	-14,14	-0,446
10	600	-12,901 ± 1,52	-18,333	-23,23	-5,792
12	400	-9,720 ± 0,32	-25,000	-24,75	-7,129
14	300	-7,202 ± 0,36	-20,000	-20,58	-6,238
16	100	-1,881 ± 0,69	-7,424	-11,36	-2,673
18	10	1,003 ± 0,6	3,636	-6,82	1,782
20	10	0,069 ± 0,21	4,394	2,65	1,485
22	10	0,321 ± 0,52	4,091	3,79	1,634

PPFD = Densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)**Anexo 4.** Comparación de la variación diurna de NEE ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en floración.

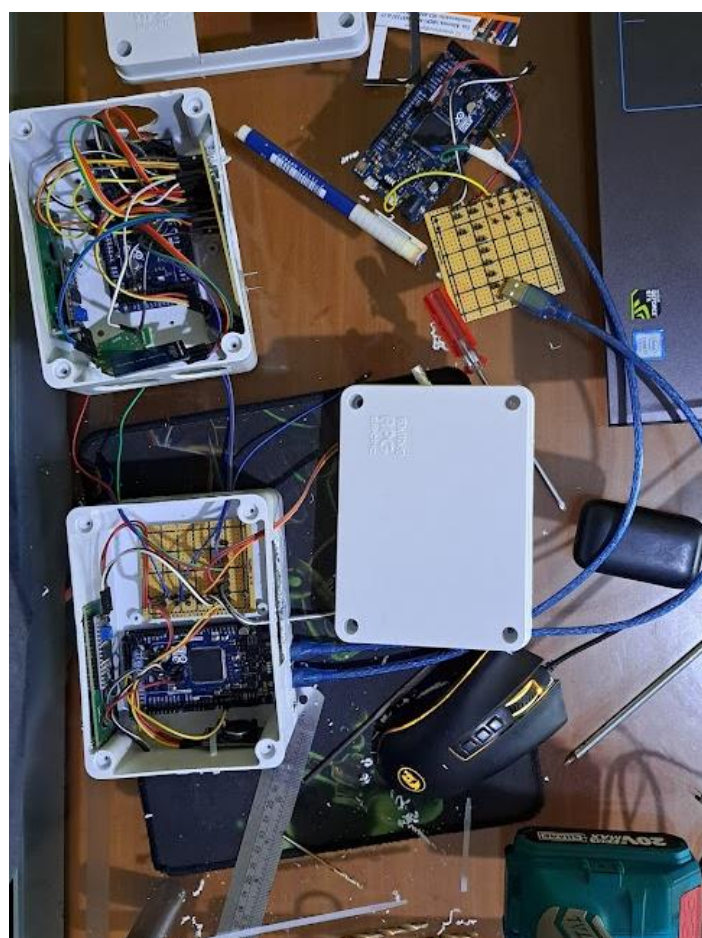
Hora	PPFD Yang <i>et al.</i> (2016)	DDS		Referencias	
		126	Chatterjee <i>et al.</i> , (2020)	Kumar <i>et al.</i> , (2021)	Neogi <i>et al.</i> , (2021)
0	10	-0,084 ± 0,15	3,750	2,82	2,513
2	10	-0,065 ± 0,19	3,750	2,69	2,932
4	10	0,059 ± 0,4	3,913	3,19	2,513
6	10	0,097 ± 0,5	3,098	2,44	1,675
8	200	-5,021 ± 0,28	-4,402	-10,26	-8,796
10	600	-12,489 ± 1,12	-13,207	-19,43	-8,168
12	400	-8,468 ± 0,35	-18,261	-19,69	-8,586
14	300	-6,330 ± 0,28	-17,446	-18,43	-8,168
16	100	-1,899 ± 0,8	-6,848	-2,84	-3,560
18	10	0,218 ± 0,42	1,793	3,44	1,885
20	10	0,074 ± 0,28	3,750	3,82	2,304
22	10	0,069 ± 0,3	3,587	1,06	2,094

PPFD = Densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

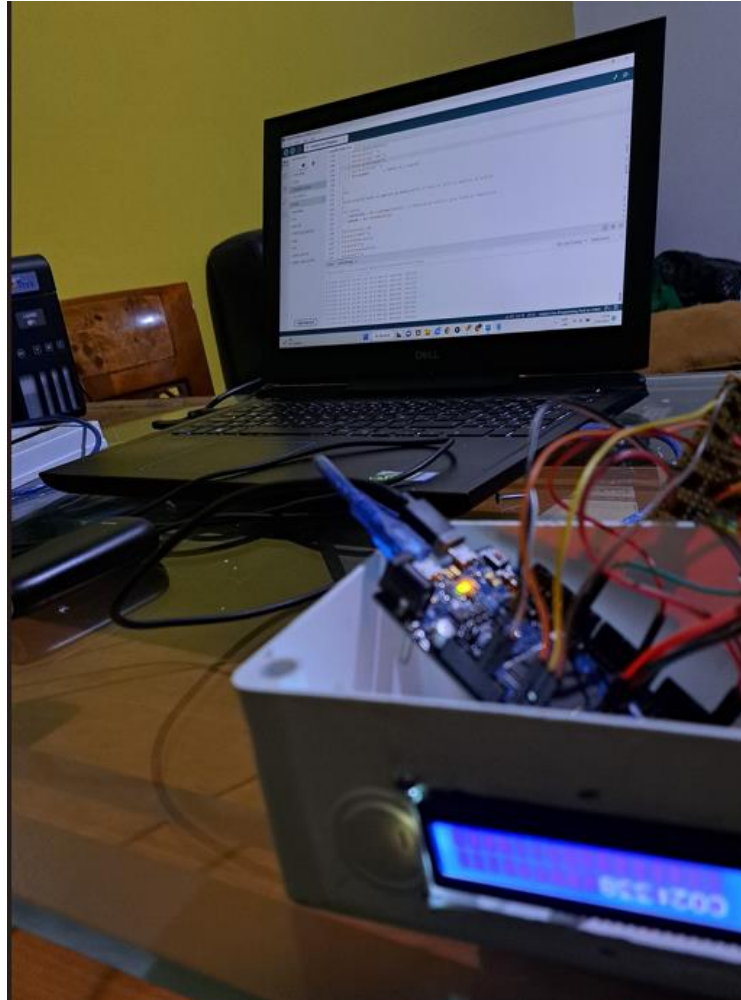
Anexo 5. Panel fotográfico



a. Preparación de las pozas del AER



b. Ensamblaje del prototipo multisensores



c. Programación del prototipo multisensor



d. Fertilización de parcelas



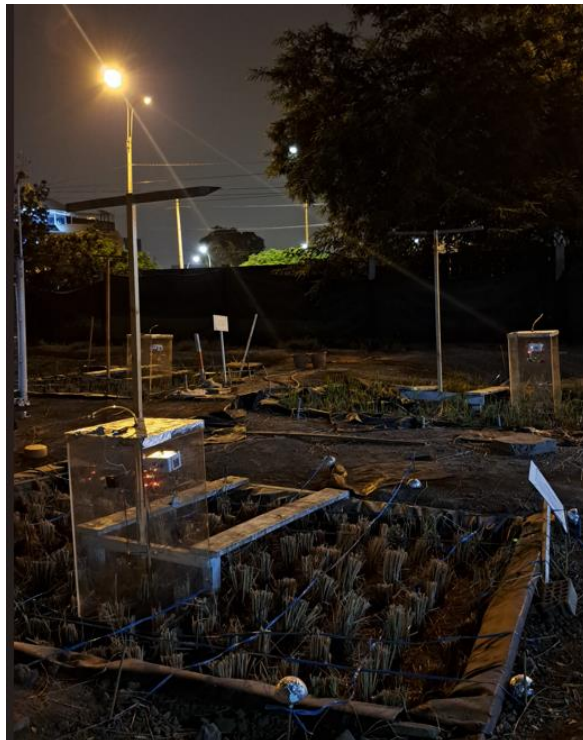
e. Preparación para el monitoreo de GEI



f. Monitoreo GEI mediante cámaras estáticas



g. Implementación del prototipo multisensor



h. Monitoreo diurno de NEE