

Capítulo 25. Emisiones de gases de efecto invernadero en el cultivo del arroz en Chile

Sara Hube S., Gabriel Donoso Ñ., Marta Alfaro V., Viviana Becerra V., Mario Paredes C.

Efecto invernadero y cambio climático

La atmósfera es una delgada capa de gases que rodea la Tierra y que resulta fundamental para el desarrollo de la mayor parte de la vida en el planeta, compuesta, mayoritariamente, por nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2). Sólo un 1 % de su composición corresponde a los gases que son responsables del fenómeno natural conocido como efecto invernadero, que consiste en un proceso físico donde la radiación infrarroja emitida desde la superficie terrestre, es absorbida por moléculas gaseosas, lo que hace que la luz solar sea más eficiente para calentar la atmósfera y elevar su temperatura media, otorgando condiciones favorables para el desarrollo de la vida. Los gases más importantes en este proceso son el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) y se conocen como Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Caballero et al., 2007).

Las actividades antropogénicas, como la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo, la deforestación y las actividades agropecuarias, entre otras, han generado un aumento significativo de los GEI en la atmósfera que contribuyen a un rápido incremento de la temperatura media de la Tierra. Este fenómeno es conocido como calentamiento global y se estima que, a la fecha, corresponde a 1 °C con respecto a los niveles preindustriales, siendo probable que llegue a 1,5 °C entre 2030 y 2050 si continúa aumentando al ritmo actual. Este incremento de la temperatura ha dado lugar a profundas alteraciones en los sistemas humanos y naturales, incluidos aumentos en las sequías; inundaciones y algunos otros tipos de clima extremo; aumento del nivel del mar; y pérdida de biodiversidad (IPCC, 2014). Las personas más afectadas viven en países de ingresos bajos y medios, algunos de los cuales han experimentado una disminución en la seguridad alimentaria (IPCC, 2012).

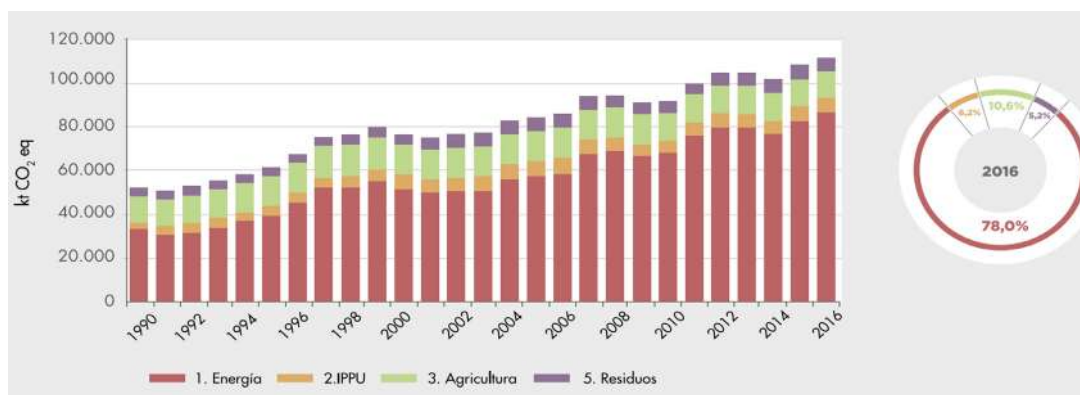
A nivel mundial se han considerado cinco sectores como los principales emisores de GEI, entre éstos el sector AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use o Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra) es responsable del 24 % de las emisiones globales (Tubiello et al., 2014), siendo el segundo sector más importante en sus contribuciones, detrás del sector energía y uso de combustibles fósiles.

El promedio mundial de emisiones de CO_2 por persona es de 4,4 t CO_2 . Chile, aunque sólo contribuye con aproximadamente 0,25 % al total mundial de las emisiones de GEI, sobrepasa por muy poco el promedio mundial, al registrar 4,7 t CO_2 por persona, cifra que se encuentra por debajo del promedio de los países de la OCDE que alcanzan 9,2 t CO_2 por persona (MMA, 2018). Sin embargo, es importante notar que las emisiones del país se han incrementado en un 114,7 % desde 1990 y en 20 % desde 2007. El principal GEI emitido en 2016 fue el CO_2 (78,7 %), seguido del CH_4 (12,5 %), N_2O (6 %) y los gases fluorados (2,8 %) (MMA, 2018).

En la agricultura, el arroz es el cereal que más contribuye en la emisión de GEI, representando un 10 % de las emisiones del sector AFOLU. Los principales gases emitidos por este sector son el CH_4 y N_2O , cuyos potenciales de calentamiento global (PCG) son 28 y 265 veces superiores al de 1 molécula de CO_2 .

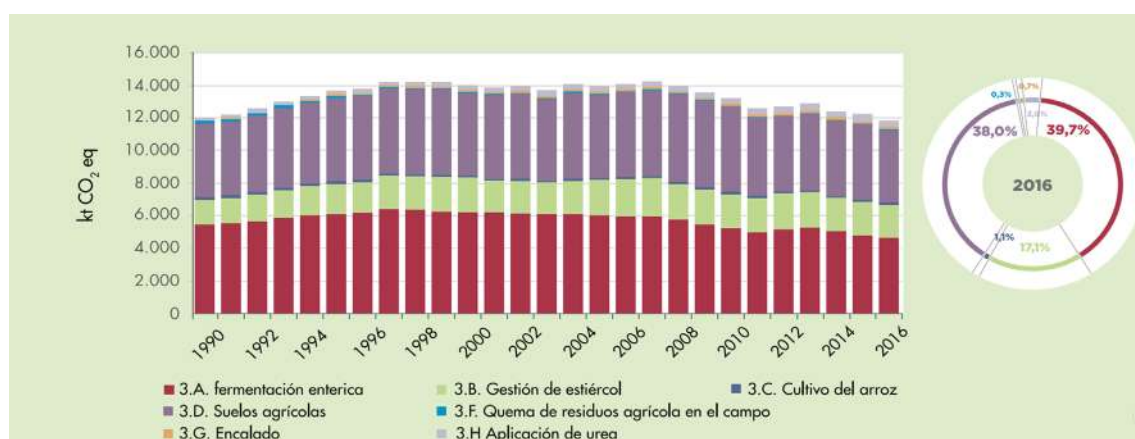
En Chile, el sector Energía es el principal contribuyente a las emisiones con un 78 % del total nacional, seguido por Agricultura con un 10,6 % (Figura 1). Dentro del sector agricultura el cultivo de arroz es la quinta categoría emisora de GEI, representando el 1,1 % (Figura 2). En 2016, sus emisiones totalizaron 133,7 kilotoneladas de equivalente de CO_2 (kt CO_2 eq), las que presentaban una disminución en un 18,6 % desde 1990, pero con un nuevo incremento de 26,4 %, desde 2013. El

principal causante de la tendencia y las variaciones interanuales es la variabilidad de la superficie plantada, la que depende fuertemente del precio internacional y de las importaciones de arroz (MMA, 2019).



Fuente: MMA, 2019

Figura 1. Emisión de GEI en los cinco principales sectores emisores. (IPPU: Industrial Processes and Product Use).

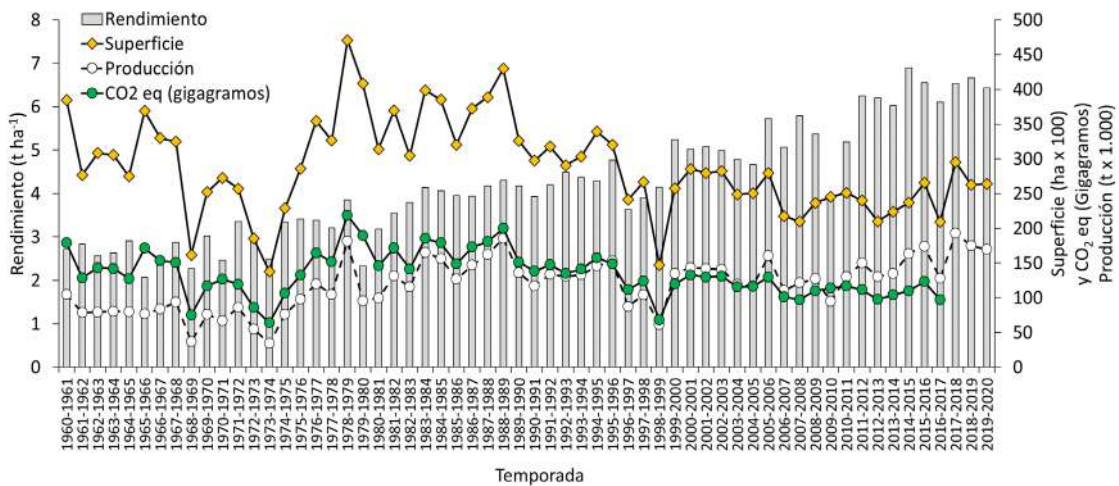


Fuente: MMA, 2019

Figura 2. Distribución de las emisiones de GEI en los distintos sectores y distribución de las emisiones globales en el sector AFOLU.

En Chile, la superficie dedicada al cultivo de arroz es cercana a 26 mil hectáreas (Figura 3). El arroz se cultiva en la Región del Maule en las comunas de Linares, Longaví, Retiro, Parral (Carbonell, 2017) y la recientemente creada Región de Ñuble en las comunas de Ñiquén, San Carlos y San Nicolás. El típico suelo arrocerero en Chile presenta baja infiltración y una capa de tosca impermeable a baja profundidad (Paredes et al., 2013).

Considerando la información de rendimientos, producción y superficie desde 1960, se observa una constante disminución en la superficie sembrada con arroz desde 1978 (FAO, 2020a). A pesar de ello, el incremento del rendimiento en grano ha aumentado, con una menor superficie de siembra. Adicionalmente, a pesar del incremento de la producción y los rendimientos, la emisión de GEI, calculada como CO₂ equivalente, ha mostrado una disminución (FAO, 2020b) (Figura 3).



Fuente: FAO, 2020a y 2020b

Figura 3. Producción de arroz y cálculo de emisión de GEI en Chile (1960-2017).

Compromisos de Chile en acuerdos Internacionales

En 1988 se creó el IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático), por iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Este panel fue responsable de la preparación de un primer informe que reunió los estudios de investigación de 400 científicos, con la evidencia de que el calentamiento atmosférico de la Tierra era real y pedía a la comunidad internacional que tomara las medidas necesarias para limitar el efecto de este fenómeno.

En marzo de 1994, los gobiernos aprobaron la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), ratificada por Chile el mismo año, con el objetivo de apoyar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático.

Posterior a esta situación, los países han firmado una serie de acuerdos y compromisos para estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que permita que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático y, de esta forma, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir un desarrollo económico sostenible.

Chile, al igual que todas las partes que han suscrito el Acuerdo de París, elabora, actualiza periódicamente y da a conocer el inventario nacional de sus GEI (INGEI) a la comunidad nacional e internacional (CMNUCC). Además, debe elaborar e implementar estrategias y políticas de reducción de emisiones necesarias para cumplir con los compromisos adquiridos en su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés).

Desde el 2015, año en que se presentó la primera NDC de Chile, se ha avanzado de manera sustantiva en el desarrollo de la institucionalidad, de políticas y de capacidades en materia de cambio climático. El liderazgo y organización de Chile en la Conferencia de la ONU sobre el Cambio Climático del año 2019 (COP25), representó un fuerte impulso en la sensibilización y conocimiento de la problemática de cambio climático en todos los niveles de nuestra sociedad, llevando a Chile a establecer metas más ambiciosas y a dar urgencia a la acción climática (NDC, 2020).

El 9 de abril de 2020, Chile hizo entrega de la actualización de su NDC a la CMNUCC, con metas a mediano y largo plazo, con el objetivo claro de alcanzar carbono neutralidad al año 2050, tal como se ha establecido en el Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático que actualmente se encuentra en discusión en el Congreso Nacional. La reducción de las emisiones se cumplirá con la aplicación de políticas y medidas en todos los sectores, buscando que ésta sea efectiva y per-

manente en el tiempo, y con el logro de metas específicas del sector agrícola, como el cambio del uso del suelo y la reforestación (UTCUTS). La completa ejecución de las acciones analizadas para todos los sectores, debiera permitir alcanzar, a lo menos, un 30 % de reducción del balance de GEI en 2030, en relación a 2016 (NDC, 2020).

Emisiones de GEI en cultivo de arroz y opciones de mitigación

El cultivo de arroz de riego constituye una importante fuente de emisión de CH_4 atmosférico y, por lo tanto, tiene un impacto significativo en el clima y en la fotoquímica atmosférica. Este cultivo está fisiológicamente adaptado para crecer bajo una lámina de agua, la cual proporciona condiciones ideales para las emisiones de metano. Las tasas de emisión varían con las características del suelo, el manejo agronómico del cultivo, la temperatura y el estado vegetativo de la planta. La emisión de CH_4 desde los suelos arroceros a la atmósfera depende de los distintos mecanismos que la controlan (Conrad, 1993; Yagi et al., 1997; Le Mer y Roger, 2001).

La producción de CH_4 involucra una comunidad microbiana metanogénica que puede metabolizar en ausencia de oxígeno y con potenciales redox de menos de -150 mV, degradando la materia orgánica, a través de varios productos intermedios, a CO_2 y CH_4 . Los organismos metanogénicos más importantes en suelos arroceros suelen ser los *Methanobacterium* y *Methanosarcina* (Conrad, 1993; Neue, 1993). Estos metanógenos dependen de una gran cantidad de otros microorganismos, para proporcionarles los pocos sustratos que pueden catabolizar. Entre éstos está el hidrógeno, que se incrementa rápidamente posterior a la desaparición del oxígeno, aumentando el CO_2 , que a su vez es utilizado para la formación de CH_4 . Una parte importante del CH_4 producido proviene de transmetilación de los ácidos volátiles, ya que el aerénquima del arroz permite la difusión del O_2 a la rizósfera y, por lo tanto, proporciona micrositos óxicos dentro del suelo saturado, anóxico. Esta situación permite la oxidación de CH_4 y hace posible la participación de otras bacterias aeróbicas en el recambio de CH_4 . El aerénquima del arroz también proporciona la ruta predominante para el escape de CH_4 del suelo a la atmósfera y puede golpear burbujas que constituyen depósitos de CH_4 en el suelo sumergido (Conrad, 1993; Figura 4).

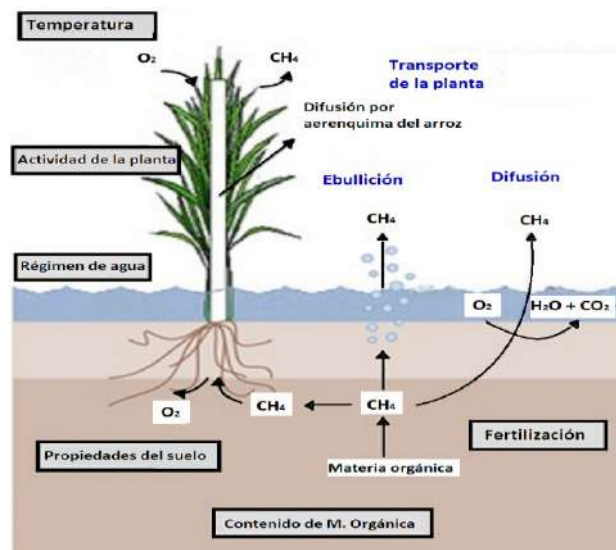


Figura 4. Mecanismos que controlan la emisión de metano en el cultivo de arroz inundado (Adaptado: Yagi et al., 1997; Sanchis et al., 2012).

La materia orgánica del suelo y de las enmiendas orgánicas aplicadas al cultivo son las principales fuentes de CH_4 en los suelos arroceros (Yagi y Minami, 1990; Kimura et al., 1992; Sanchis et al.,

2012). Sin embargo, la producción de CH_4 puede estar limitada por el pH, textura (arenosa o limosa o un alto contenido de arcilla caolinítica) que puede reducir la saturación del suelo (Neue et al., 1990; Bachelet y Neue, 1993), la capacidad de intercambio catiónico baja (suelos férricos y ferricos), la salinidad (suelos tíonicos y solonchaks), y por un alto potencial redox (Conrad, 1993; Neue, 1993; Cai et al., 2000) que permite inhibir las bacterias metanogénicas estrictamente anaerobias (suelos crómicos y plínticos).

Además de los factores mencionados, existen otros factores que pueden influir en la capacidad de las bacterias CH_4 -oxidantes en las emisiones de CH_4 ; entre ellos la variedad de arroz, la incorporación de rastrojo, manejo del agua (inundado permanente vs. no inundado permanente), y fertilización nitrogenada. Por lo anterior, es importante mejorar la disponibilidad de O_2 y otras prácticas de manejo agronómico que permitan reducir las emisiones de GEI. El aumento de los niveles de oxígeno en el suelo permitirá aumentar la oxidación de CH_4 rizosférica y, al mismo tiempo, disponer o proveer de sustratos para las bacterias metanogénicas en el metabolismo aeróbico o a las vías anaerobias en competencia (Gilbert y Frenzel, 1995; Yagi et al., 1997; Chirinda et al., 2018).

Avances de investigación en Chile en Gases de Efecto Invernadero en arroz

Chile como país miembro de la Alianza Global de Investigación en Gases de Efecto Invernadero en Agricultura (GRA, por sus siglas en inglés), y desde la primera reunión oficial de la Alianza en el año 2010, ha participado de las reuniones de los distintos grupos de investigación, con el objetivo de cooperar, formar capacidades técnicas, tener acceso a las metodologías de medición de GEI en agricultura, y generar información local que permita cuantificar el problema y diseñar políticas de adaptación y mitigación para la agricultura nacional.

En el año 2013 se organizó la primera reunión en Latinoamérica del grupo de investigación en arroz de la GRA. En esta reunión se estableció la necesidad de establecer un subgrupo de investigación en Latinoamérica que permitiera una mayor participación y cooperación de los países miembros, e implementar metodologías uniformes en medición de GEI para conocer los aportes reales de estos gases en los inventarios nacionales de GEI.

Tomando en cuenta estos lineamientos, el mismo año (2013) se estableció un grupo de trabajo en INIA, tendiente a adaptar e implementar la metodología y protocolos para la medición de GEI en cultivo de arroz en el país y establecer el primer experimento en este ámbito. El objetivo general de este experimento fue evaluar el efecto del nitrógeno en la emisión de GEI, para lo cual se comparó la aplicación de dos dosis de nitrógeno, aplicado en tres parcialidades: siembra, macolla e inicio de panícula. Este ensayo experimental se estableció en la Estación Experimental Francisco Jiménez del INIA, ubicado en la localidad de Parral.

Los resultados no presentaron diferencias significativas de las dos dosis de nitrógeno utilizadas sobre el rendimiento en arroz paddy (Figura 5).

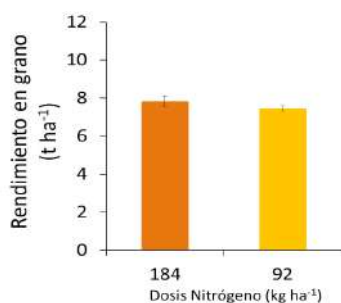


Figura 5. Efecto de la dosis de nitrógeno en el rendimiento en grano de arroz en la temporada 2013-2014, en la localidad de Parral.

Los resultados de las mediciones de GEI realizadas periódicamente durante el ciclo de desarrollo del cultivo del arroz, permitieron observar un aumento del metano, hasta la etapa de floración de la planta, donde alcanza el máximo, con una posterior disminución de las emisiones hasta el período de madurez (Figura 6).

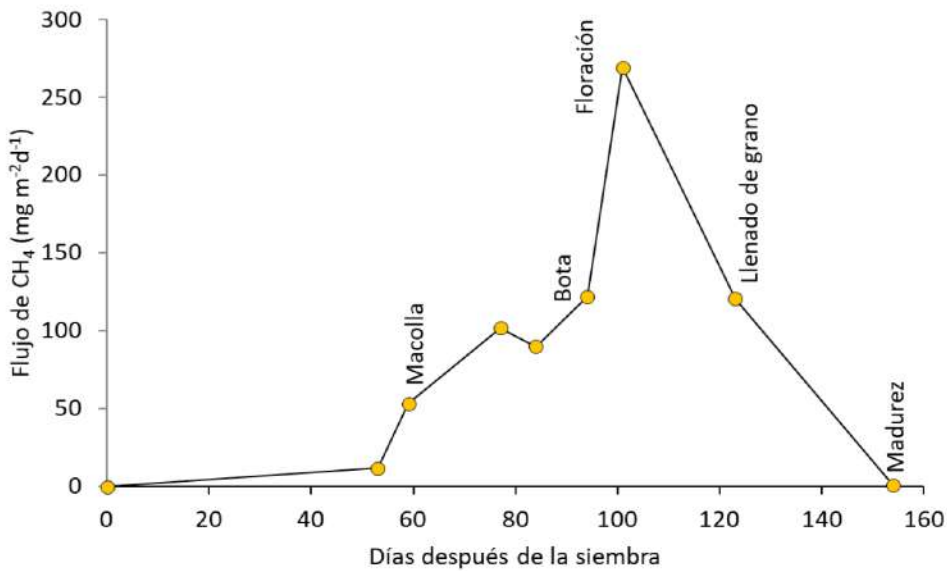


Figura 6. Emisión diaria de metano por etapa fenológica del cultivo del arroz en la temporada 2013-2014, en Parral.

Posteriormente, otros estudios experimentales tuvieron como objetivo general determinar el efecto de la incorporación del rastrojo y la aplicación de nitrógeno (92 kg N ha^{-1}) sobre las emisiones de metano en el cultivo de arroz. Estos ensayos se realizaron durante las temporadas 2014-2015 y 2015-2016, en la misma localidad de Parral. Los resultados de estos ensayos indicaron un efecto positivo del nitrógeno y de la incorporación de rastrojo sobre el rendimiento de grano del arroz, es decir, un rendimiento de 6 t ha^{-1} en ausencia de N y sin rastrojo y un promedio de 9 t ha^{-1} con incorporación de rastrojo y N al suelo, parcializado a la siembra, macolla e inicio de panícula (Figura 7).

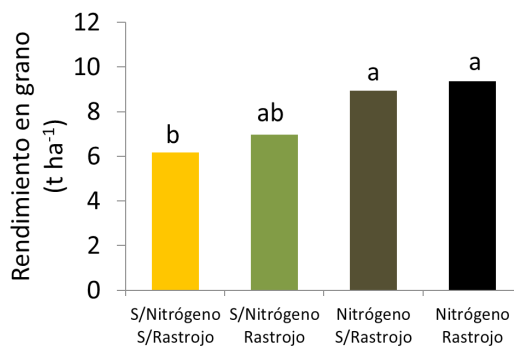


Figura 7. Rendimiento en grano de arroz en diferentes condiciones, uso de nitrógeno y presencia de rastrojo, en las temporadas 2014-2015 y 2015-2016, en Parral. Letras diferentes corresponden a diferencias entre las medias (LSD Fisher; $p < 0,05$).

Los resultados obtenidos de las evaluaciones realizadas entre los años 2013-2016, proporcionaron la primera información empírica sobre las emisiones de GEI en arroz de Chile (Figura 8). En la temporada 2013-2014 se observaron valores de emisión de metano entre 105 y 130 kg CH₄ ha⁻¹, sin diferencia entre los tratamientos con diferentes dosis de nitrógeno. Sin embargo, los valores más altos se obtuvieron en la temporada 2014-2015 (245-315 kg CH₄ ha⁻¹) donde no se observó diferencia entre los tratamientos. Por otro lado, los valores más bajos se observaron en la temporada 2014-2015 (58-105 kg CH₄ ha⁻¹) en los tratamientos sin incorporación de rastrojo.

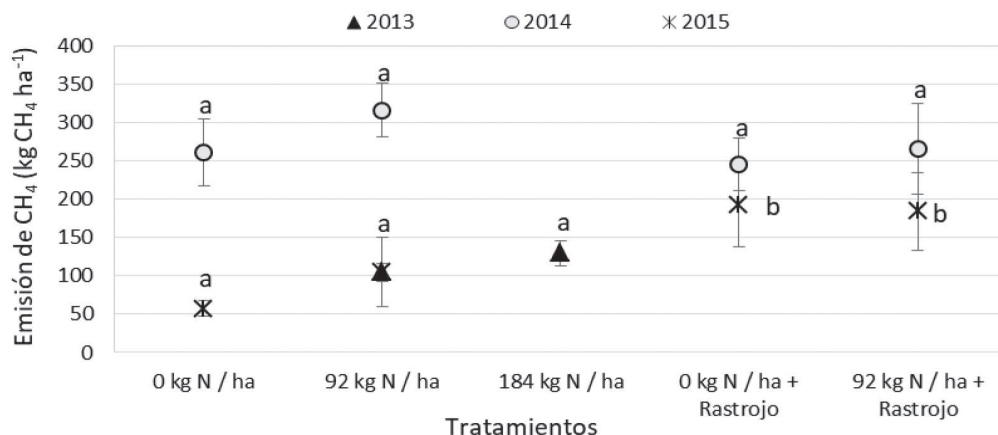


Figura 8. Emisión acumulada de CH₄ (kg de CH₄ ha⁻¹) por tratamiento y temporada de cultivo evaluada. Barras de error corresponde al error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamiento por año evaluado ($p < 0,05$).

Finalmente, al analizar la correlación que existe entre el rendimiento y la emisión de GEI, se observó una correlación positiva, significativa ($R^2=0,8$; $p < 0,05$) (Figura 9). Con ello se puede inferir que el incremento de los rendimientos en grano podría estar asociado a un incremento en la emisión de GEI en nuestro país.

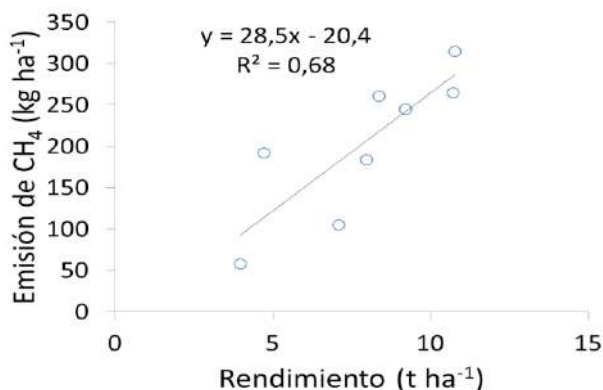


Figura 9. Correlación entre el rendimiento en grano y la emisión de metano. La línea continua corresponde a línea de tendencia de una regresión lineal. La línea corresponde a la ecuación que explica la variación observada en los datos, y que está expresada en el coeficiente de determinación R^2 .

Esta investigación preliminar permitió a INIA continuar participando en foros y proyectos internacionales como el proyecto 'Formación de capacidades en tecnologías de gestión para el cultivo

de arroz climáticamente inteligente, en el sector arrocero del Sudeste de Asia y América Latina, financiado por el Foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC) en el año 2018. El objetivo del proyecto fue, por un lado, compartir resultados de investigación e intercambiar información sobre tecnologías de gestión para la adaptación y mitigación del cambio climático en el sector del arroz con los países miembros de la APEC y, por otro lado, difundir a nivel local la información disponible a los actores de la cadena arrocera nacional. Esta actividad fue realizada en la ciudad de Parral (Foto 1).



Foto 1. Participantes de Seminario de Capacitación Internacional y Día de Campo en la Estación Experimental Francisco Jiménez, en Parral, Chile.

Más arroz con menos emisiones y menor consumo de agua

El sector agrícola enfrenta el doble desafío de aumentar la producción de alimentos para satisfacer las crecientes demandas, mientras intenta adaptarse al clima cambiante. Dos aspectos son prioritarios en el cultivo del arroz. El primero es la urgente necesidad de hacer un mejor uso del agua, sobre todo en el período actual de sequía que está afectando la región. Segundo, es la necesidad de evaluar como país, los niveles de emisión de GEI que el cultivo del arroz genera, debido a que éste es una de las especies que más contamina el ambiente con CH_4 .

El proyecto FONTAGRO se focaliza en ambos problemas: disminuir el uso de agua, para disminuir las emisiones de GEI, sin afectar los rendimientos, como una forma de tener un arroz más sustentable. Los tres países participantes del proyecto (Colombia (Líder), Chile y Perú) tienen como objetivo general evaluar la técnica del riego intermitente (AWD, Alternate Wetting and Drying) como alternativa de mitigación sobre las emisiones de GEI, manteniendo los niveles productivos del arroz. La técnica de riego intermitente (AWD) aumenta la disponibilidad de O_2 durante el drenado del agua del suelo, otorgando condiciones y sustratos para bacterias metanogénicas en el metabolismo aeróbico o en vías anaerobias en competencia, lo que permite reducir las emisiones de CH_4 (Yagi et al., 1997; Hou et al., 2000). Las evaluaciones realizadas incluyen el rendimiento y calidad del arroz producido, las emisiones de gases, consumo de agua, y los costos asociados al uso de estas tecnologías.

El AWD es una tecnología que ha sido ampliamente probada y promovida en varios países de Asia, especialmente en Filipinas, China, Vietnam y Bangladesh. En Filipinas, la tecnología ha sido probada y promovida desde 2001 (Lampayan et al., 2003). La práctica de manejo del riego incluye períodos alternados de inundación y secado (AWD), durante las fases de crecimiento no crítico del cultivo, aumentado la eficiencia en el uso del agua en un 23 %, sin afectar el rendimiento en

grano (Bouman y Tuong, 2001; Carrijo et al., 2017). El AWD consiste en que el suelo se seca periódicamente, entre el estado de 3-5 hojas hasta el inicio de la panícula, y cuando se agota el agua disponible del suelo en un 50 %, se riega dejando una lámina de agua de 5 cm y así sucesivamente. De esta manera, este sistema genera un ahorro de agua de riego de un 29 % (equivalente a $2.067 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Si bien en algunos casos se han reportado pérdidas de rendimiento de $1,3 \text{ t ha}^{-1}$ de arroz (Carracelas et al., 2019), otras experiencias muestran ahorros de entre 43 y 54 %, en comparación al control, sin pérdidas de rendimiento en grano ($7 \text{ a } 8 \text{ t ha}^{-1}$) y con una mayor productividad de agua (Lampayan et al., 2015).

Otros estudios han informado una reducción en el aporte de agua en un 15 % a 30 %, sin que ello tenga un impacto significativo en el rendimiento. Al parecer, un régimen moderado de intermitencia de humedad y secado del suelo puede mejorar el crecimiento de las raíces, lo que beneficia a otros procesos fisiológicos, y da como resultado un mayor rendimiento de grano (Zhang et al., 2009). Por lo tanto, el sistema AWD es un sistema de riego adecuado para reducir el costo de riego, aumentar las ganancias, mantener un riego adecuado y asegurar el potencial de rendimiento de los cultivos (Carracelas et al., 2019). Por otro lado, el sistema tradicional de inundación continua del arroz ha presentado, como consecuencia una tendencia a una mayor acumulación de arsénico en el grano de arroz, junto a mayores emisiones de GEI (Seyfferth et al., 2018).

Durante la temporada 2018-2019 se estableció el primer ensayo en la Estación Experimental Francisco Jiménez del INIA, ubicado en la localidad de Parral. Para este ensayo se evaluó la variedad 'Zafiro-INIA', bajo el sistema AWD con una profundidad de riego de 5 cm (AWD1) y 10 cm (AWD2), usando como testigo la inundación permanente. Además, se evaluaron dos sistemas de siembra (pregerminada y siembra directa). Los tratamientos de riego se realizaron entre etapa de plántula e inicio de etapa reproductiva. La fertilización se realizó basada en el análisis de suelo (120 kg de Superfosfato Triple ha^{-1} ; 160 kg de muriato de potasio ha^{-1} y 340 kg de urea ha^{-1}). Tanto para la siembra directa y la siembra de pre germinado, se realizó un control químico de malezas convencional del cultivo de arroz, mediante herbicidas de post-emergencia. Para la medición y monitoreo de altura de agua de riego, se utilizaron piezómetros en cada parcela y la cuantificación del agua utilizada se realizó mediante caudalímetros ($3/4''$) (Figura 10).

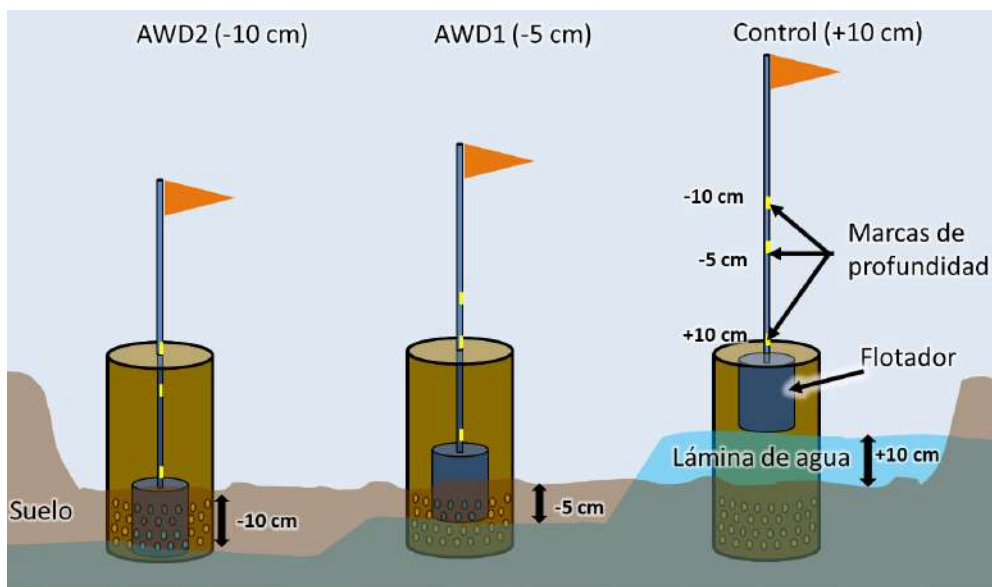


Figura 10. Modelo de piezómetros utilizados para monitoreo del nivel de agua en los tratamientos. Control (lámina de agua sobre 10 cm de la superficie del suelo (+10 cm)); AWD1 (lámina de agua bajo 5 cm de la superficie del suelo (-5 cm)); y AWD2 (lámina de agua bajo 10 cm de la superficie del suelo (-10 cm)).

Los GEI se midieron en tres tiempos de muestreo y 36 veces entre octubre y abril, y con una mayor frecuencia de medición después de cada práctica agronómica realizada sobre las parcelas (siembra, riego, control de malezas y aplicación de fertilizante). Se usaron cámaras estáticas (Foto 2), con altura variable dependiendo del tamaño del arroz. El diseño fue de bloques al azar, con cuatro repeticiones por tratamiento. Los GEI fueron analizados por cromatografía de gases, Perkin Elmer Modelo Clarus 600, y los resultados fueron analizados por ANOVA.



Foto 2. A: Cámara inicial; B: Cámaras para estado más avanzado de crecimiento.

Efecto del AWD sobre el rendimiento en arroz

En siembra directa, el rendimiento en grano paddy del tratamiento de control ($9,6 \text{ t ha}^{-1}$) fue similar a los tratamientos de AWD1 y 2 ($11,3$ y $7,6 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente) (Figura 11 A). Solamente se destaca que el tratamiento de AWD2 presentó rendimientos un 37 % inferiores al tratamiento AWD1. Esto indica que la disminución del agua de hasta 10 cm bajo el nivel del suelo, afectó el desarrollo de la planta y su rendimiento en grano (Gutiérrez, 2019).

Por otro lado, en la siembra de arroz pregerminado (B), el tratamiento de control (inundación permanente) y los tratamientos AWD1 y AWD2 obtuvieron rendimientos de $9,6$, $9,9$ y $8,8 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente. En este sistema de siembra no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos AWD (Figura 11 B).

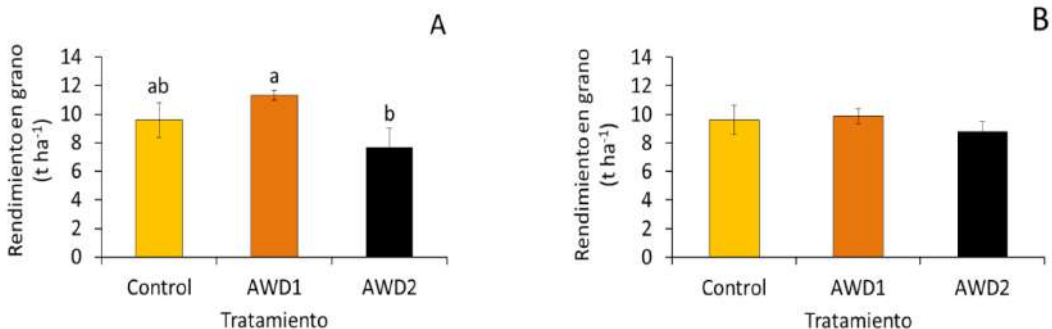
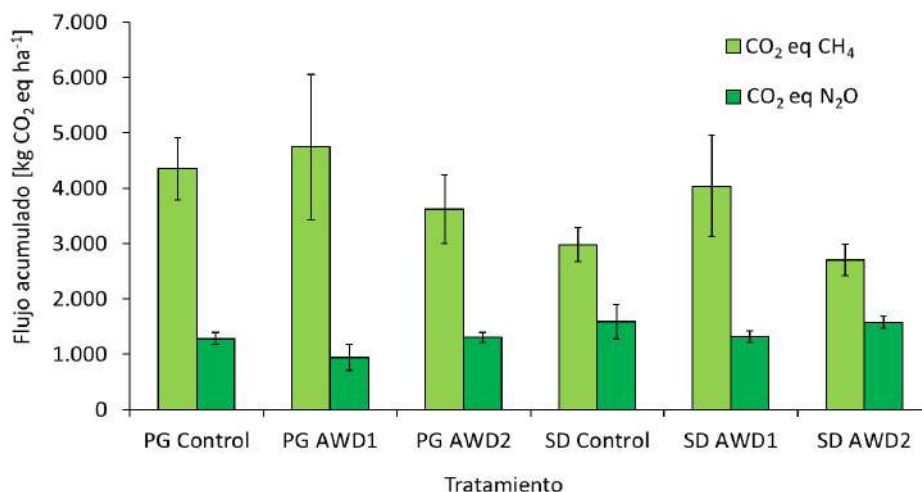


Figura 11. Rendimiento en grano en siembra directa (A) y siembra pregerminada (B), con distintos tratamientos de riego. Control= inundado permanente; AWD1=5 cm; AWD2=10 cm. Temporada 2018-2019, Parral. Letras minúsculas corresponden a diferencias entre las medias de los tratamientos ($P > 0,05$, LSD Fisher).

Efecto del AWD sobre los niveles de GEI en arroz

El análisis de la emisión de gases de efecto invernadero mostró un importante aumento en la emisión de metano en el ensayo siembra pregerminado, en comparación con la siembra directa (Figura 12). Por otro lado, la emisión de óxido nitroso fue levemente superior en el sistema de siembra directa en comparación al sistema inundado. Los valores más bajos de emisión de metano se observaron en los tratamientos con menos uso de agua (AWD2), siendo más notoria esa diferencia en el ensayo de siembra de arroz pregerminado (Figura 12).



Fuente: Proyecto Fontagro 2021

Figura 12. Flujo acumulado durante 162 días ($\text{kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$) de metano y óxido nitroso en diferentes tratamientos de riego y metodología de siembra. PG (siembra pregerminado) y SD (siembra directa). Control (inundación permanente), AWD1 (inundación intermitente hasta cuando el nivel de agua baja a -5 cm de la superficie del suelo) y AWD2 (inundación intermitente hasta cuando el nivel de agua baja a -10 cm de la superficie del suelo).

Consideraciones finales

Hasta ahora, los resultados muestran que es posible usar menos agua para producir rendimientos sustentables, con una tendencia a disminuir la emisión de metano cuando se utiliza menos agua, y un incremento en el óxido nitroso. Con los resultados de dos temporadas, se generará una propuesta tecnológica, que deberá ser validada en campos de productores, y además se aportarán factores de emisión país específico para la construcción de los inventarios nacionales de GEI.

Referencias

- Bachelet, D., Neue, H. 1993. Methane emissions from wetland rice areas of Asia. *Chemosphere* 26(1-4):219-237.
- Bouman, B., Tuong, T. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agric. Water Manage.* 49(1):11-30.
- Caballero, M., Lozano, S., Ortega, B. 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Rev. Digital Univ.* 8(10):1-11.
- Cai, Z., Tsuruta, H., Minami, K. 2000. Methane emission from rice fields in China: measurements and influencing factors. *J. Geophys. Res. Atmos.* 105(D13):17231-17242.

- Carbonell, C. 2017. Estudio de estándar de sustentabilidad para el sector arrocero. Odepa, Santiago, Chile.
- Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosas, J., et al. 2019. Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. *Agric. Water Manage.* 222:161-172.
- Carrijo, D., Lundy, M., Linqvist, B. 2017. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Res.* 203:173-180.
- Chirinda, N., Arenas, L., Katto, M., et al. 2018. Sustainable and low greenhouse gas emitting rice production in Latin America and the Caribbean: A review on the transition from ideality to reality. *Sustainability* 10:671.
- Conrad, R. 1993. Mechanisms controlling methane emission from wetland rice fields p. 317-335. In Oremland, R. (ed.) *Biogeochemistry of Global Change*. Springer, Boston, Massachusetts, USA.
- FAO. 2020a. FAOSTAT-base de datos producción. FAO, Roma, Italia. faostat.fao.org/site/630/default.aspx.
- FAO. 2020b. FAOSTAT-base de datos indicadores agroambientales. FAO, Roma, Italia. faostat.fao.org/site/630/default.aspx.
- Gilbert, B., Frenzel, P. 1995. Methanotrophic bacteria in the rhizosphere of rice microcosms and their effect on porewater methane concentration and methane emission. *Biol. Fert. Soils* 20(2):93-100.
- Gutiérrez, J. 2019. Efecto del riego intermitente sobre el cultivo del arroz. Tesis de pregrado. Universidad Adventista de Chile, Escuela de Agronomía, Chillán, Chile.
- Hou, A., Chen, G., Wang, Z., et al. 2000. Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(6):2180-2186.
- IPCC. 2012. Summary for policymakers. p. 3-21. In Field, C.B., Barros, V.R., Stocker, T.F., et al. (eds.) *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri, R.K., and Meyer, L.A. (eds.) IPCC, Geneva, Switzerland.
- Kimura, M., Miura, Y., Watanabe, A., et al. 1992. Methane production and its fate in paddy fields: I. Effects of rice straw application and percolation rate on the leaching of methane and other soil components into the subsoil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 38(4):665-672.
- Lampayan, R.M., Bouman, B.A., de Dios, J.L., et al. 2003. Adoption of water saving technologies in rice production in the Philippines. *Extension Bulletin 548*. Food and Fertilizer Technology Center, Taipei, Taiwan.
- Lampayan, R., Samoy-Pascual, K., Sibayan, E., et al. 2015. Effects of alternate wetting and drying (AWD) threshold level and plant seedling age on crop performance, water input, and water productivity of transplanted rice in Central Luzon, Philippines. *Paddy Water Environ.* 13:215-227.
- Le Mer, J., Roger, P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *Eur. J. Soil Biol.* 37(1):25-50.
- MMA. 2018. Tercer informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/3rd-BUR-Chile-SPanish.pdf>.
- MMA. 2019. Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile serie 1990-2016. Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Santiago, Chile.
- NDC. 2020. Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile. (Disponible en: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf).

- Neue, H.U. 1993. Methane emission from rice fields. *Bioscience* 43(7):466-474.
- Neue, H., Becker-Heidmann, P., Scharpenseel, H. 1990. Organic matter dynamics, soil properties, and cultural practices in rice lands and their relationship to methane production. p. 457-466. In Bouwman, A.F. (ed.) *Soils and the greenhouse effect*. Wiley, Chichester, UK.
- Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2013. Programa de arroz: Aporte a la producción Nacional. Edición Especial Programa de Arroz INIA: Transfiriendo Ciencia y Tecnología para fortalecer la competitividad del sector. *Tierra Adentro* 104:35-42.
- Sanchis, E., Ferrer, M., Torres, A., et al. 2012. Effect of water and straw management practices on methane emissions from rice fields: a review through a meta-analysis. *Environ. Eng. Sci.* 29(12):1053-1062.
- Seyfferth, A., Limmer, M., Dykes, G. 2018. Chapter two - On the use of silicon as an agronomic mitigation strategy to decrease arsenic uptake by Rice. *Adv. Agron.* 149:49-91.
- Tubiello, F., Salvatore, M., Córdor-Golec, R., et al. 2014. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks. *FAO Statistics Division Working. Paper Series ESS/14-02*.
- Yagi, K., Minami, K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36(4):599-610.
- Yagi, K., Tsuruta, H., Minami, K. 1997. Possible options for mitigating methane emission from rice cultivation. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 49(1-3):213-220.
- Zhang, H., Xue, Y., Wang, Z., et al. 2009. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice. *Crop Sci.* 49(6):2246-2260.