

ANÁLISIS DE LA EMISIÓN DE METANO Y ÓXIDO NITROSO EN EL CULTIVO DE ARROZ EN COSTA RICA

Johnny Montenegro¹

RESUMEN

Análisis de la emisión de metano y óxido nitroso en el cultivo de arroz en Costa Rica. El sector arrocero costarricense tiene un rol muy importante en la seguridad alimentaria del país, pues abastece el 41 % del consumo nacional. Al igual que otros sectores, contribuye con la emisión de gases con efecto invernadero (GEI), razón por la cual es necesario analizar estas emisiones y determinar sus patrones, y con ello conocer variables que influyen su comportamiento. Esto es particularmente importante en el contexto actual con la formulación de un NAMA arroz que pretende realizar acciones de mitigación en esta actividad agrícola. Es por ello que el presente documento se desarrolló para determinar la evolución histórica de las emisiones de los gases antes mencionados que se generan durante el proceso productivo primario en el cultivo del arroz, y establecer la relación entre emisiones, la producción y el precio pagado al productor. Se estimaron las emisiones de CH₄ y N₂O que se han producido en el proceso productivo primario, tanto bajo el sistema de producción inundado como de secano desde 1990 y hasta el 2019. También se recopiló información estadística de área sembrada y rendimiento productivo por sistema de producción, precio pagado al productor por tonelada de arroz granza para el periodo antes referenciado. Se determinaron variaciones importantes en el área sembrada y en los rendimientos productivos, lo cual ha estado influenciados por el precio que recibe el productor. La emisión de CH₄ y de N₂O también fluctuaron en el tiempo como resultado de las variaciones en las áreas de siembra, lo cual generó variaciones en la eficiencia (t de CO₂eq t⁻¹ arroz granza) mostrando el precio pagado al productor ser modelador de la emisión, lo cual lo confirma la tendencia determinada en la relación entre la emisión y el valor bruto de la producción.

Palabras clave: cambio climático, metano, mitigación, óxido nitroso, valor de la producción.

ABSTRACT

The Costa Rican rice sector plays a very important role in the production of food for the country, and like different sectors, contributes with the emission of methane and nitrous oxide gases, which is why it is necessary to monitor these emissions now because this can allow the determination of patterns, and with it know variables that influence the determined trends. This is particularly important when formulating a rice NAMA that aims to carry out mitigation actions in this agricultural activity. That is why this document was developed to determine the historical evolution of emissions that are generated during the primary production process in

¹ Investigador en Cambio Climático y Agricultura, Convenio: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Agropecuaria (INTA) – Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica. jmontenegro@imn.ac.cr, jmontenegro@inta.go.cr. Teléfono: (506) 2222-5616 / Fax: (506) 2223-1837. ORCID:0000-0001-8526-570X.

rice cultivation, and to establish its relationship with production and the price paid to the producer. The emissions of CH_4 and N_2O that have been produced in the primary production process were estimated since 1990 and up to 2019, both under flooded and rain fed production systems. Statistical information on the planted area and productive yield by production system, price paid to the producer per ton of rice, was also collected for the same period of time before mentioned. There were detected important variations in the planted area and in productive yields, which have been influenced by the price received by the producer. The emission of CH_4 and N_2O also fluctuated over time as a result of variations in the sowing areas, which generated variations in efficiency ($\text{t CO}_2\text{eq t}^{-1}$ rice) showing that the price paid to the producer being a modeler of the emission, which is confirmed by the trend determined in the relationship between the emission and the gross value of production.

Keywords: climate change, methane, mitigation, nitrous oxide, production value.

INTRODUCCIÓN

El sector arrocero costarricense tiene un rol muy importante en la producción de alimento para el país, y contribuye significativamente no solo en este aspecto, sino también con la seguridad socio-económica de un sector de la población al proporcionar empleos directos e indirectos.

El sector productivo primario, en el último año lo constituyeron aproximadamente 500 productores, de estos más del 75% tienen áreas menores a 50 ha y en conjunto producen menos del 20% de la cosecha nacional. La proporción del consumo nacional producido en el país fue de 41% en el 2020 (Conarroz 2020).

Este sector, al igual que otras actividades agropecuarias es afectado por el cambio climático, el cual se produce como resultado de la acumulación de gases con efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Existen diferentes fuentes de estos gases, por lo que el primer paso para la solución de esta problemática, es determinar cuáles actividades son las principales emisoras, ya que ello permite priorizar sectores y con ello desarrollar opciones de mitigación.

Costa Rica al igual que los países firmantes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), efectúa periódicamente inventarios nacionales de gases con efecto invernadero (GEI), que incluyen los sectores determinados por el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), entre los que se encuentra el sector agropecuario. Sin embargo, estos datos son puntuales y para años específicos, y para el caso específico

del cultivo del arroz, la información reportada no proporciona de manera detallada cambios anuales en la emisión que se podrían suceder por las condiciones variantes que influyen en esta actividad productiva.

De acuerdo con el más reciente Inventario de GEI, el cual se realizó para el 2017 (MINAE 2021), la emisión del cultivo del arroz en equivalentes de CO_2 representó 7,5% del sector agropecuario, y 1,6 % del total de la emisión nacional; si se considera la emisión neta, el sector arrocero representó en el 2015 el 2,0% del total nacional.

El peso relativo que este sector tiene en las emisiones del país es importante, y por ello es necesario dar seguimiento a las emisiones de GEI, esto permite la determinación de patrones, y conocer las variables que influyen el comportamiento determinado. Este proceso es muy importante por cuanto permitirá de manera más técnica desarrollar opciones de mitigación para el sector arrocero, reduciendo la emisión de GEI en el cultivo del arroz, logrando con ello un producto más amigable con el ambiente y sostenible.

El sector arrocero consiente de esta situación, ha decidido participar activamente para contribuir a la solución de la problemática global del cambio climático y apoyar la Política Nacional mencionada mediante su participación activa en la formulación del NAMA arroz. El presente documento pretende apoyar ambas iniciativas con la generación y análisis de información que permita tener más clara la situación de este sector y las emisiones GEI.

No existe a la fecha en Costa Rica, documento alguno que muestre la tendencia de las emisiones provenientes del sector primario del cultivo del arroz, por lo que basado en lo anterior, los objetivos de esta investigación fueron:

determinar la evolución histórica de las emisiones GEI que se generan durante el proceso productivo primario en el cultivo del arroz, y establecer la relación de estas con la producción y el precio pagado al productor.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recopilación de información

El análisis desarrollado se realizó desde 1990 y hasta el 2019. Para esta investigación se utilizaron estadísticas de área sembrada de arroz, tanto en seco como inundado, así como de producción de arroz en granza, limpia y seca, reportada por la Corporación Arrocera Nacional (CONARROZ) en diferentes informes anuales. También se utilizó el Boletín Agropecuario de la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA), para complementar la información productiva. Con estos datos se calculó la productividad.

De la misma fuente (Conarroz) se obtuvo el precio por tonelada de arroz granza, limpia y seca en colones corrientes pagado al productor, solo que en este caso los datos accesados se inician en el 2003.

Otra información económica utilizada se limitó exclusivamente al valor bruto de la producción (VBP) de arroz, los datos en colones encadenados al 2012 fueron proporcionados por SEPSA con datos del Banco Central, mientras que del Boletín Agropecuario de SEPSA, el VBP en colones corrientes.

Cálculo de la emisión de gases con efecto invernadero

Para estimar la emisión de metano (CH_4) y óxido nítrico (N_2O) provenientes del suelo (en adelante referenciados como gases con efecto invernadero, GEI) cultivado con el arroz, se utilizaron los factores de emisión disponibles, resultado de investigaciones nacionales (Montenegro y Abarca 2001) y sugeridos por el IPCC (2006). En este proceso se utilizó el mismo procedimiento empleado para estimar la emisión reportada

en el Inventario Nacional de Gases con Efecto Invernadero y que se detalla en las guías metodológicas del IPCC (2006).

Los resultados anteriores y para cada gas se transformaron a dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) de acuerdo con los valores establecidos por la Convención Marco para el Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMCCNU).

Eficiencia de emisión

Para calcular la eficiencia de emisión (cantidad de gas CO_2eq emitido por unidad de arroz producido, también conocida como intensidad de la emisión), se totalizó el CO_2eq de todas

las fuentes, misma que se dividió entre el total de toneladas producidas. De manera que se logró obtener un valor de emisión en t de $\text{CO}_2\text{eq t}^{-1}$ de arroz granza producido.

Límites y limitaciones del estudio

Esta evaluación se desarrolló considerando exclusivamente las emisiones de GEI en la finca provenientes de la fertilización nitrogenada en arroz de secano, y el metano del arroz inundado.

Con respecto a las limitaciones, no se dispone de información detallada de variaciones en las dosis de fertilizante aplicadas, entre años y entre productores, razón por la cual se utiliza una cantidad constante de 80 kg de nitrógeno ha⁻¹ ciclo⁻¹ de cultivo (Tinoco y Acuña 2009). No se incluyen las emisiones que provengan de la aplicación, terrestre o aérea, de agroquímicos a las plantaciones.

Debido a que no se dispone con el cambio de uso del suelo en el tiempo, este análisis no incluyó las emisiones y absorciones provenientes del potencial cambio de uso del suelo que haya podido ocurrir en el tiempo, es decir, aquellas originadas por la transformación de áreas forestales o de otras actividades agropecuarias a terrenos dedicados a la siembra de arroz. Tampoco se considera el cambio que podría estar ocurriendo con el carbono orgánico del suelo ya que no se dispone de este tipo de información.

Manejo estadístico de los datos

Con los datos disponibles se procedió a realizar figuras para mostrar tendencias y se realizaron análisis de correlación entre diferentes variables: producción, productividad, valor de la producción y, emisión por tipo de gas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aspectos productivos

Área cultivada

El área sembrada de arroz, tanto en secano como inundado, ha variado a través del tiempo (figura 1). En el caso del área bajo inundación, esta ha representado en promedio 35% del total sembrado desde 1990 y hasta el 2019, con variaciones anuales que van del 21 al 48% del total. El área total sembrada mostró su menor valor en el 2019 (33.049 ha) y el mayor en el 2010 con 81.116 ha.

Se pueden observar tres secciones, correspondientes cada una a una década (90's, 00's, y 10's); en la primera de ellas existió la tendencia al incremento del área sembrada (figura 1) En la siguiente década, el área de secano presentó tendencia clara al incremento, algo que no sucedió con la de inundación. Finalmente, la tercer década es clara, el área de siembra disminuye de manera significativa en ambos sistemas de producción (figura 1).

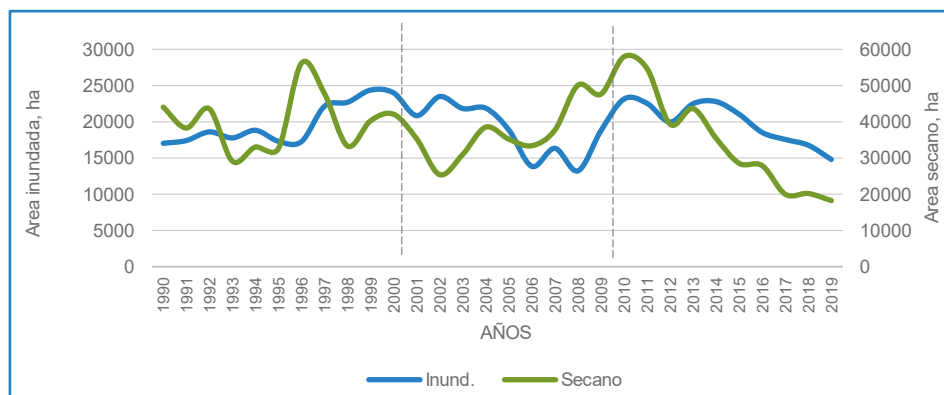


Figura 1. Área, ha, sembrada de arroz inundado y en secano. Costa Rica.

Producción y productividad

La variación en el área sembrada (figura 1) se manifestó en la producción total obtenida, sin que haya una clara relación entre esta y la productividad cuando se observa el periodo analizado de manera grupal (figura 2). Sin embargo, cuando se analizan los datos por década, la situación es más clara (figura 3) y muestra que la productividad cambia ligeramente con la producción.

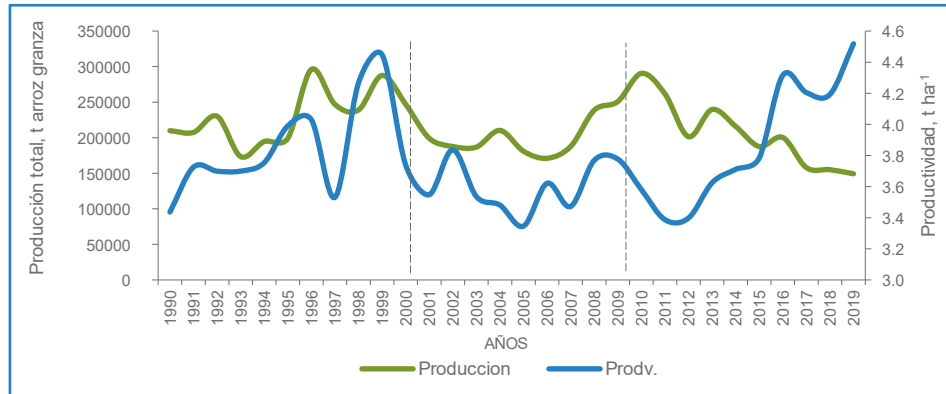


Figura 2. Producción total, t, y productividad, t ha⁻¹, de arroz en granza. Costa Rica.

En las décadas de los 90's y 00's (figuras 3a y 3b), aunque sin significancia estadística, existe tendencia a que el incremento de la producción está ligada al mejoramiento de la productividad, sin embargo, en la última década es claro que la tendencia se revierte (figura 3c).

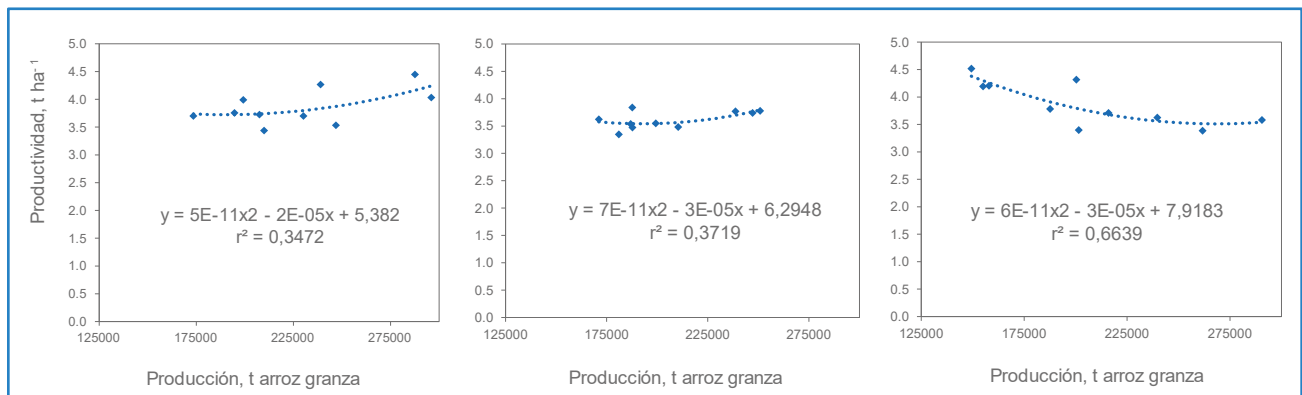


Figura 3. Relación entre la producción total de arroz en granza, t, y la productividad, t⁻¹ ha, según década. Costa Rica.

Esas tendencias están ligadas al precio por tonelada de arroz en granza seca y limpia que recibieron los productores. En colonias corrientes, los precios se incrementaron del 2003 al 2010 (figura 4), lo cual estimuló a los productores particularmente a los de secano, quienes aumentaron las áreas sembradas durante la década del 00 (figura 1), sin que ello se manifestara claramente en la productividad (figura 3b).

En la última década el precio se ha mantenido relativamente estable (figura 4), lo cual, sin duda no estimula la siembra de este grano, y por el contrario ha mostrado clara tendencia a la disminución (figura 1) y que se manifiesta también en la producción total obtenida (figura 2) y se observó en la productividad (figura 3c). Sin duda el precio que reciben los productores es uno de los grandes modeladores de esta actividad.

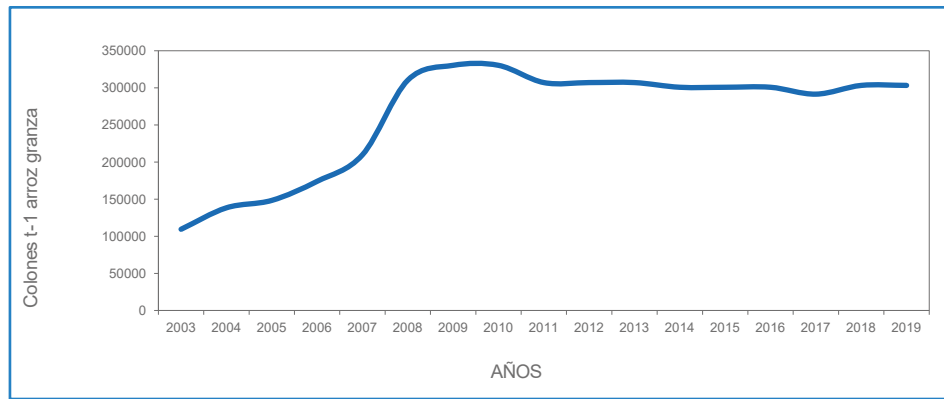


Figura 4. Precio pagado al productor, colones corrientes, por tonelada de granza limpia y seca. Costa Rica.

Emisión de gases con efecto invernadero (GEI)

Metano y óxido nitroso

La emisión de CH_4 y de $\text{N}_2\text{O-N}$ han fluctuado (figura 5) como resultado de las variaciones que se han producido en las áreas de siembra (figura 1). Las mayores emisiones de metano suceden en los años donde el área sembrada en inundación fue la más grande (1999, 2010 y 2014), mientras que las del $\text{N}_2\text{O-N}$ se presentaron en 1996, 2010 y el 2011 cuando se observaron las mayores áreas sembradas en secano (figura 1).

Por otra parte, es clara la disminución de la emisión de ambos gases que ocurre en la década del 2010 (figura 5), la cual es resultado de la reducción de las áreas de siembra, tanto en secano como bajo inundación (figura 1).

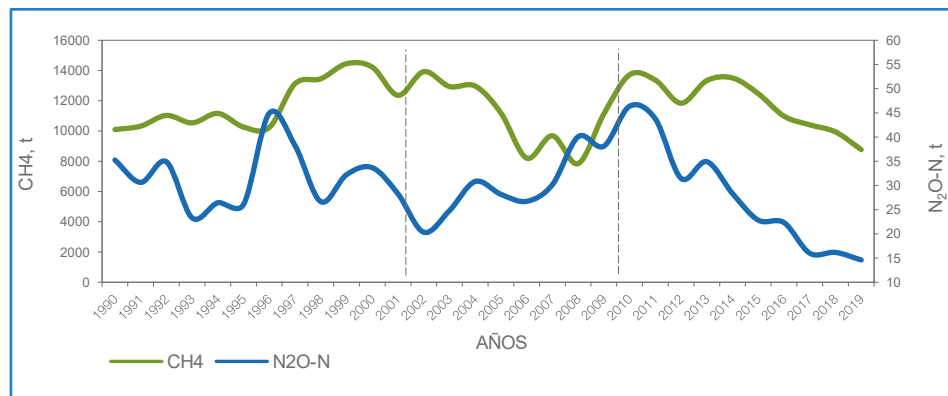


Figura 5. Emisión de metano y óxido nitroso, t, proveniente del cultivo de arroz anegado y secano. Costa Rica.

Emisión total

La emisión total de GEI, en equivalentes de CO₂, desde 1990 y hasta el 2019 muestra grandes fluctuaciones con diferentes tendencias en el tiempo (figura 6) como resultado de las variaciones en el área sembrada (figura 1). La primera parte de la década de los 90's fue relativamente estable con valores promedio anual de 236,4 Gg, valor que posteriormente se incrementa a 306,0 Gg. A mediados de la siguiente década se reduce la emisión a valores promedio anual de 195,9 Gg, para volver a incrementarse a 218,3 Gg a finales de la década del 2000.

Después del 2010, se presenta tendencia a la baja (figura 6), siendo el promedio anual de esta última década de 262,0 Gg, aunque el valor para el 2019 fue de 191,3 Gg similar a los observados en el 2006 y 2008 (figura 6).

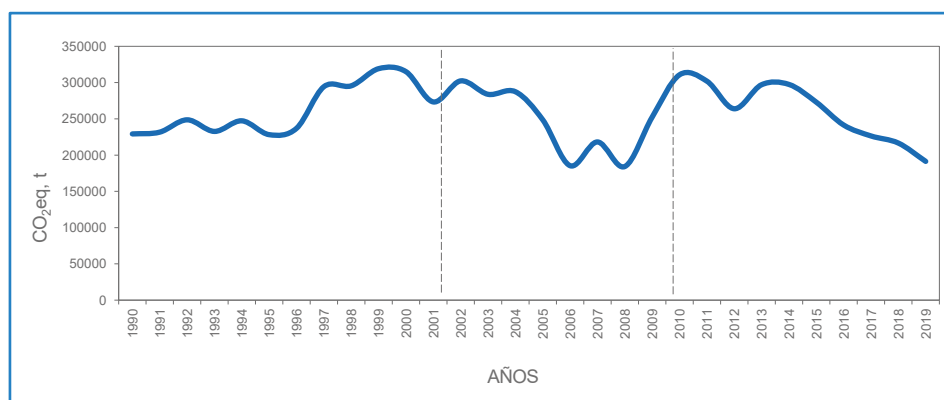


Figura 6. Emisión total GEI, t CO₂eq, desde 1990 en el cultivo de arroz. Costa Rica.

La importancia relativa de la emisión del cultivo del arroz, con respecto a la emisión nacional neta reportada en los diferentes inventarios nacionales de gases con efecto invernadero que se han realizado en el país, varía entre 2,5 y 4,0%; la relación es inferior (del 2,0 al 2,8%) si se considera la emisión bruta.

En su estudio de análisis de ciclo de vida en el cultivo del arroz, Muhammadi *et al.* (2014) determinaron entre 828 y 1806 kg de CO₂eq ha⁻¹, valores que son inferiores al estimado en esta investigación.

Relaciones

En este apartado se analiza la emisión en función del área sembrada, la producción y, el valor bruto de la producción.

Emisión y área sembrada

La emisión GEI, en t de CO₂eq ha⁻¹, no mostró relación alguna con el área sembrada de arroz en las décadas del 90 y 00 (figura 7a y 7b). Sin embargo, si se determinó correlación positiva ($P < 0,00012$) para la última década (figura 7c). La razón de este comportamiento se debe a que durante las dos primeras décadas el área sembrada de arroz inundado y seco, en términos generales, mostraron comportamiento inverso, es decir mientras una se reducía la otra se incrementaba (figura 1). Esta situación cambió en la última década donde ambas áreas se redujeron (figura 1) y ello condujo a la reducción de la emisión (figura 6), y se muestra claramente la relación directa entre área sembrada y emisión (figura 7c).

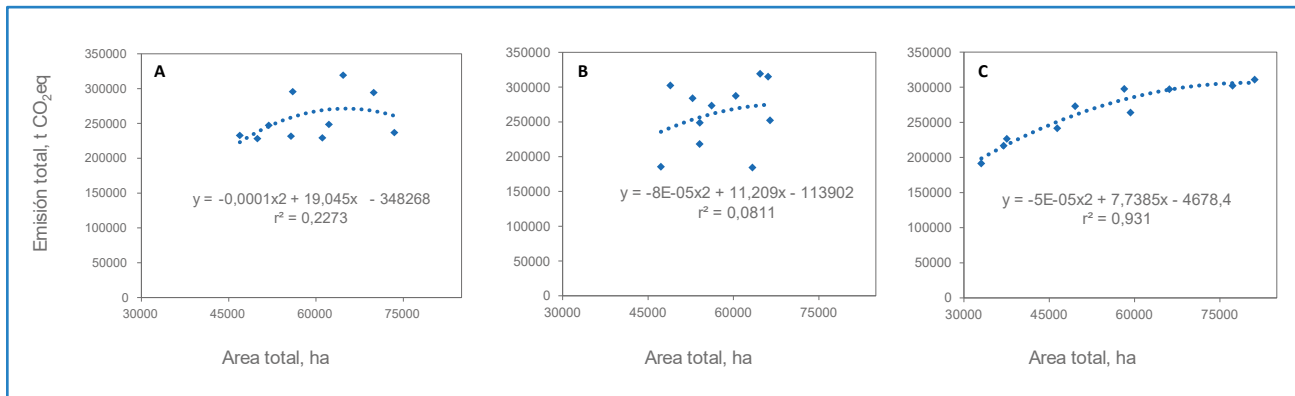


Figura 7. Relación entre el área total sembrada de arroz, ha, y la emisión GEI, t⁻¹ CO₂eq según década. Costa Rica.

Cuando se considera solamente la emisión proveniente de la fertilización nitrogenada utilizada en el sistema de arroz seco, el valor promedio fue de 206 ± 43 kg de CO₂eq ha⁻¹, el cual es inferior a lo reportado en estudios de Andrade, Campo y Segura (2014) y González, Méndez e Izquierdo (2014), quienes también determinaron que la emisión derivada de esta práctica constituye el mayor porcentaje de la emisión total.

Emisión de CO₂eq y producción de arroz

La relación entre la emisión y la producción total de arroz presenta un promedio anual de $1,2 \pm 0,2$ t de CO₂eq t⁻¹ de arroz granza, con fluctuaciones en el tiempo (figura 8) como resultado de las variaciones de la producción (figura 2) y del área sembrada en seco e inundado (figura 1).

El valor más alto de esta relación se observó en el 2002; ello se explica porque si bien en ese año no se determinó la mayor emisión (figura 6), si se presentó una de las producciones más bajas (figura 2). Con respecto a los valores bajos, los menores se determinaron en 1996 y en el 2008. Ello está determinado por la baja proporción de

área sembrada bajo inundación (figura 1) y la alta producción y productividad lograda en esos años (figura 2).

En la década del 90, la relación mostró estabilidad inicial para fluctuar posteriormente hasta 1996, año a partir del cual se incrementa hasta finales de esa década. La siguiente década mostró que a partir del 2002 y hasta el 2008 se mejoró sustancialmente esta relación al pasar la emisión de $1,6$ a $0,8$ t de CO₂eq t⁻¹ arroz granza. A partir de ese año, la relación nuevamente se incrementa (figura 8).

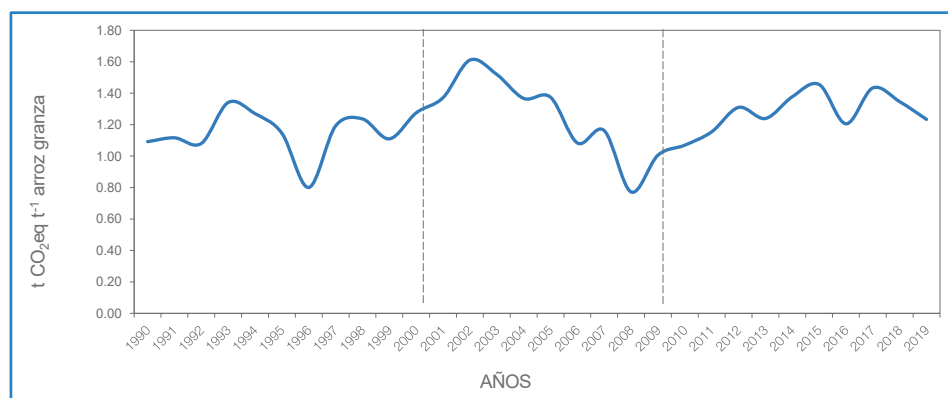


Figura 8. Eficiencia histórica de la emisión, t CO₂eq t⁻¹ arroz en granza, en Costa Rica.

El valor promedio de la eficiencia de emisión durante el período analizado fue de $1,23 \pm 0,19$ kg de $\text{CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ de arroz granza, siendo muy similar al determinado en el 2019 (figura 8).

Por otra parte, se determinó correlación significativa ($P < 0,0022$) entre la producción anual de arroz granza y la emisión de CO_2eq (figura 9A),

la cual muestra que la emisión se incrementa conforme la producción aumenta. En términos promedio, el cambio observado es el incremento de $0,34$ t CO_2eq por cada tonelada de arroz granza, aunque es claro que con las mayores producciones la emisión tiende a estabilizarse (figura 9A).

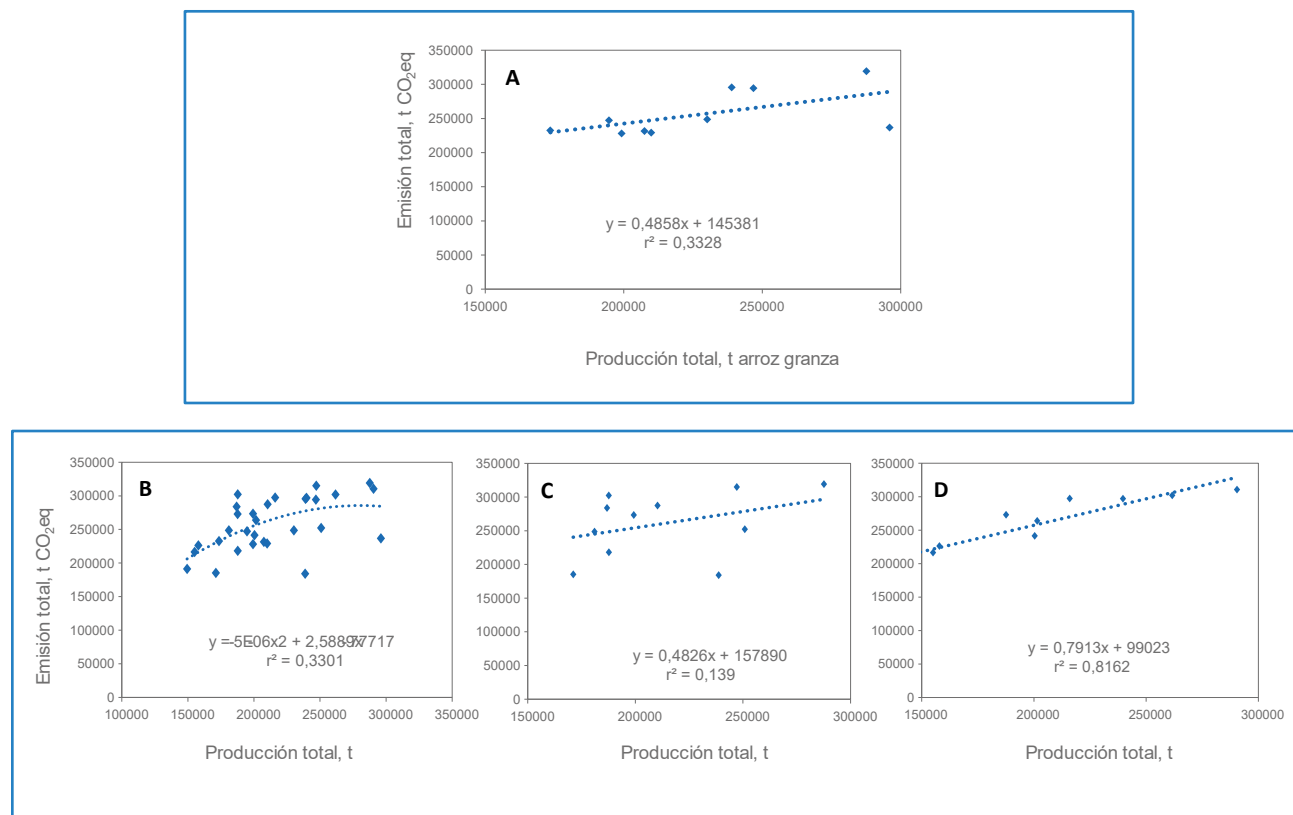


Figura 9. Relación entre la producción total de arroz en granza, t, con la emisión de $\text{CO}_2\text{eq t}^{-1}$. Costa Rica.

En términos decadales (figuras 9b-d), a pesar de que en todas las décadas la tendencia es al incremento lineal de la emisión con la producción, únicamente la última de ellas mostró ser significativa (figura 9d).

Productividad y emisión en CO_2eq .

La productividad mostró correlación significativa con la emisión para las décadas del 90 y del 10, con tendencia polinómica, siendo en la primera positiva (figura 10a), mientras que negativa la otra (figura 10c), es decir en los 90's, a mayor productividad mayor emisión, lo cual fue contrario en la década del 2010. Esto es el resultado del mejoramiento en el manejo de las áreas sembradas

para hacerlas más productivas, lo cual ha sido la respuesta del productor para lograr mantenerse en la actividad dado la estabilidad de precios en los últimos años (figura 4).

La década del 2000 no mostró relación alguna entre las variables mencionadas (figura 10b).

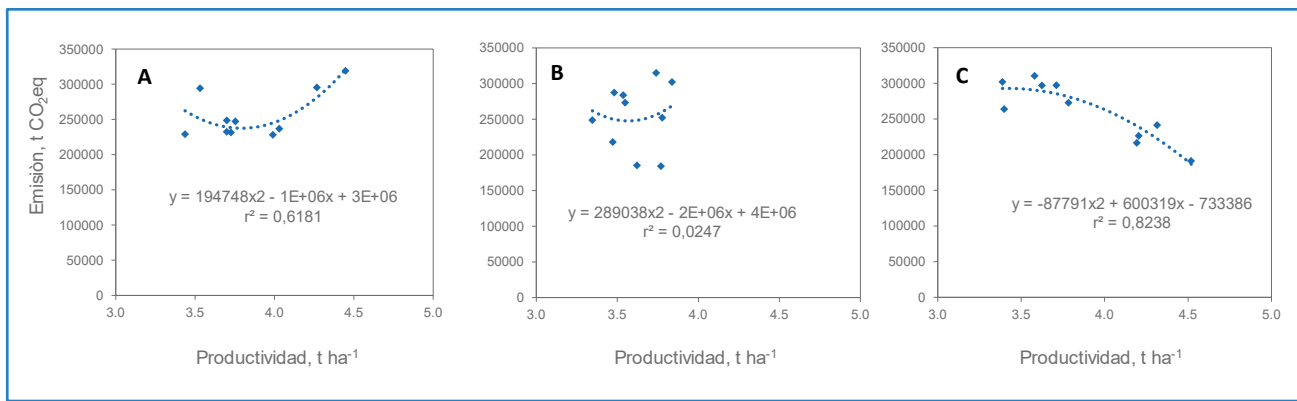


Figura 10. Relación entre la productividad, t de arroz en granza ha⁻¹, con la emisión de CO₂eq, t⁻¹. Costa Rica.

Emisión y valor bruto de la producción

Cuando se relaciona la emisión GEI con el valor bruto de la producción **en colones constantes** del 2012, se observan fluctuaciones en el tiempo, y con cierta tendencia a incrementarse en los últimos años sin llegar al valor determinado a inicios de la década de los 90's (figura 11). La tendencia es polinómica y muestra cómo se redujo la emisión por millón de colones hasta el 2010, año a partir del cual se estabiliza con cierto incremento a finales de la siguiente década (figura 11). El valor más bajo de esta relación se estimó en el 2008, año donde se determinó una de las menores emisiones (figura 6) y un buen precio en recibido por los productores (SEPSA 2020).

En el caso del valor bruto de la producción **en colones corrientes**, la figura es clara, mostrándose a partir del 1993 una disminución importante de la emisión por millón de colones, para estabilizarse a partir del 2008 (figura 11) como resultado del precio recibido por los productores, el cual no se ha incrementado desde el 2009 (figura 4). En este sentido es coincidente la reducción de la emisión por millón de colones con el incremento del precio que ocurrió desde el 2003 y hasta el 2009 (figura 4). Esto demuestra el efecto moderador que tiene el precio en esta relación.

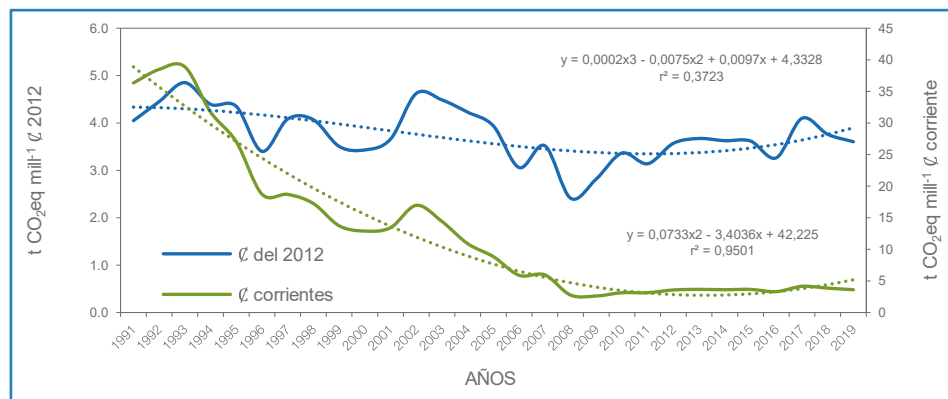


Figura 11. Relación entre la emisión de CO₂eq y el valor bruto de la producción de arroz en colones corrientes y constantes del 2012. Costa Rica.

Algunas opciones de mitigación de GEI en el cultivo de arroz

Diferentes acciones de mitigación pueden ser desarrolladas para reducir las emisiones de metano y óxido nítrico en este cultivo, y seguidamente menciono algunas.

Una de las primeras acciones a realizar es la ejecución de trabajos de campo para cuantificar, de acuerdo con el manejo actual del cultivo y las variedades más comúnmente utilizadas, la emisión de GEI. Con ello será posible actualizar los valores utilizados como factores de emisión y en consecuencia, reducir el grado de incertidumbre asociado con la estimación de la emisión nacional en la actividad arrocera.

De igual forma, esfuerzos deben realizarse para estimar los potenciales cambios que se podrían estar presentado en el carbono orgánico del suelo bajo este cultivo, tanto en el sistema bajo inundación como en seco.

Un aspecto a considerar es la implementación de diferentes prácticas y técnicas que permitan reducir las emisiones tanto del CH_4 como del N_2O al mismo tiempo que se continúe desarrollando el proceso productivo con iguales o mejores rendimientos. Ello tendrá un impacto positivo en esta actividad.

En este sentido diferentes investigaciones muestran resultados promisorios con la utilización de técnicas para mitigar las emisiones GEI durante el proceso productivo primario. Algunos de ellos han enfocado la utilización de variedades con baja emisión de metano (Gogoi *et al.* 2008, Jiang *et al.* 2017) y muestran como nuevas variedades de arroz altamente productoras pueden reducir significativamente la emisión de metano.

El manejo del agua es otra técnica que ha sido evaluada con el propósito de mitigar las emisiones de metano. En este sentido Tyagi, Kumari y Singh (2009) al igual que Islam *et al.* (2020) mostraron que la continua inundación produce mayor cantidad de metano que cuando se aplica drenaje en diferentes etapas de crecimiento del cultivo.

Investigaciones realizadas por Thammasom, Vityakon y Saenjan (2016) muestran como el potencial Redox está relacionado con la

metanogénesis y, en consecuencia, con la emisión de este gas, por lo que el manejo de esta variable muestra potencial para mitigación en la producción de arroz anegado.

La reducción de la incorporación de residuos vegetales previo a la preparación del suelo para la siembra del arroz ha sido uno de los aspectos mencionados en diferentes trabajos de investigación (Thammasom, Vityakon y Saenjan 2016, Wang *et al.* 2017) como una forma de mitigar tanto la emisión de metano como de óxido nítrico.

La utilización de inhibidores de la nitrificación y estrategias de fertilización nitrogenada también pueden mitigar las emisiones de N_2O y aumentar el rendimiento de granos y la eficiencia del uso de nitrógeno en condiciones de arroz de siembra directa (Gaihre *et al.* 2020).

La aplicación de una o varias de las opciones mencionadas, sin que sean las únicas, podrían contribuir de manera significativa en la mitigación de GEI generados en el proceso productivo primario y contribuir decididamente a la consecución de la meta de neutralidad tanto para esta actividad como para el país.

La emisión de GEI provenientes del proceso productivo primario del cultivo del arroz mostró variaciones en el tiempo como resultado de cambios en el área total sembrada, y por el área dedicada a cada sistema de producción, lo cual influye directamente en el tipo de GEI generado. Ello hace variar la importancia relativa de la emisión de este cultivo con respecto al total neto nacional, promediando en los últimos cuatro inventarios nacionales 3,2%.

La relación de la emisión con la producción es directa y positiva, y lineal en cada una de las décadas analizadas, así que conforme se incrementa la producción también lo hace la emisión. En el caso de la productividad, esta mostró un comportamiento bastante interesante al ser positiva la correlación con la emisión en la década del 90, pero negativa la del 2010.

Por otra parte, el precio que recibe el productor por su cosecha es el principal

modelador de la eficiencia económica de la emisión, la cual mostró clara tendencia a la baja cuando se expresa en colones corrientes; la misma relación no fue tan clara cuando se utilizan colones constantes del 2012.

Finalmente, diferentes opciones de mitigación podrían implementarse en la producción primaria de este grano, lo cual sin duda mejoraría los valores de las distintas relaciones consideradas.

LITERATURA CITADA

- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2020. Informe anual 2020. Centro estadístico arrocerero. 39 p.
- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2019. Informe estadístico período 2018/2019. 59 p.
- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2018. Informe estadístico período 2017/2018. 57 p.
- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2017. Informe estadístico período 2016/2017. 54 p.
- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2016. Informe estadístico período 2015/2016. 54 p.
- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2015. Informe estadístico período 2014/2015. 55 p.
- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2014. Informe estadístico período 2013/2014. 53 p.
- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2013. Informe estadístico período 2012/2013. 56 p.
- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2012. Informe estadístico período 2011/2012. 58 p.
- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2011. Informe estadístico período 2010/2011. 55 p.
- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2010. Informe estadístico período 2009/2010. 52 p.
- Gaihre, Y; Singh, U; Bible, W; Fugice, J; Sanabria, J. 2020. Mitigating N₂O and NO emissions from direct-seeded rice with nitrification inhibitor and urea deep placement. *Rice Science*, 27(5):434-444.
- Gogoi, N; Baruah, K.K. & Gupta, P.K. 2008. Selection of rice genotypes for lower methane emission. *Agron. Sustain. Dev.* 28, 181-186.
- Islam, M; Kanta, Y; Islam, R; Akter, M; Al Mahmud, M; Singh, U; Ole, B. 2020. Effects of water management on greenhouse gas emissions from farmers' rice fields in Bangladesh. *Science of The Total Environment*, 734(10):139382
- Jiang, Y; Van Groenigen, K; Huang S; Hungate, B; Van Kessel, C; Hu, S; Zhang, J; Wu, L; Yan, X; Wang, L; Chem, J; Hang, X; Shang, Y; Horwath, W; Ye, R; Linnquist, B; Song, Z; Deng, A; Zhang, W. 2017. Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars. *Global Change Biology*, 23(11):4728-4738.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). Boletín estadístico agropecuario No. 27. 2017. 218 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). Boletín estadístico agropecuario No. 25. 2014. 188 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). Boletín estadístico agropecuario No. 21. 2011. 182 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). Boletín estadístico agropecuario No. 17. 2007. 74 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). Boletín estadístico agropecuario No. 15. 2004. 58 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). Boletín estadístico agropecuario No. 13. 2002. 34 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). Boletín estadístico agropecuario No. 11. 2000. 30 p.

SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). Boletín estadístico agropecuario No. 9. 1998. 28 p.

Thammasom, N; Vityakon, P; Saenjan, P. 2016. Response of methane emissions, redox potential, and pH to eucalyptus biochar and rice straw addition in a paddy soil. Songklanakarin J. Sci. Technol., 38(3):325-331.

Tinoco, R; Acuña, A. 2009. Cultivo de arroz (*Oryza sativa*). Manual de recomendaciones técnicas. INTA. 78 p.

Tyagi, L; Kumari, B; Singh, S. 2009. Water management - A tool for methane mitigation from irrigated paddy fields. Science of The Total Environment 408(5):1085-1090.

Wang, C; Lai, D; Sardans, J; Wang, W; Zeng, C; Peñuelas, J. 2017. Factors related with CH₄ and N₂O emissions from a paddy field: Clues for management implications. PLoSONE 12(1):e0169254.