

Capítulo 17. Fertilización del cultivo de arroz para sistema de siembra directa

Juan Hirzel C., Mario Paredes C., Viviana Becerra V., Gabriel Donoso Ñ.

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los principales cereales cultivados en el mundo, dada su importancia en la dieta del ser humano (Juliano, 1993; FAO, 2004). Si bien el sistema de siembra más relevante de este cultivo ha sido la inundación permanente, en los últimos años ha comenzado a ser adoptado por los agricultores el sistema de siembra directa (Chauhan et al., 2012; Mahajan et al., 2013). Así lo reportó Zhang et al. (2012) al indicar que el arroz en siembra directa representa alrededor del 90 % de la superficie sembrada con este cultivo en América.

El manejo agronómico del cultivo en siembra directa presenta algunas diferencias con el sistema de inundación permanente, destacándose el escaso movimiento de la superficie del suelo, menores pérdidas de suelo por erosión hídrica, fecha de siembra más temprana, menor necesidad de agua durante los estados iniciales del cultivo, reducción de al menos un 40% de la necesidad hídrica de todo el ciclo de cultivo, control de malezas, menor emisión de gases de efecto invernadero, y respuesta a la fertilización con nitrógeno (N) (Khan et al., 2012; Mahajan et al., 2013; Tao et al., 2016).

Para el cultivo de arroz, el N es el principal nutriente asociado al rendimiento y el empleado en mayor dosis. Sin embargo, la dosis total a utilizar y el manejo de la fertilización nitrogenada, presentan diferencias entre las principales subespecies de arroz (*indica* o *japonica*), variedades, zona geográfica, y otras prácticas realizadas en el cultivo (Angus et al., 1994; Ying et al., 1998; Bouman et al., 2007; Huang et al., 2008; Jing et al., 2008; Hirzel et al., 2011a).

Para ajustar la dosis de N en el cultivo de arroz, es importante conocer la capacidad de entrega natural de N desde el suelo a través de procesos de mineralización (Angus et al., 1994). Esta capacidad es altamente dinámica en el tiempo, difícil de estimar, además de representar sólo una pequeña fracción del N total del suelo (Scott et al., 2005; Wienhold, 2007). Para evaluar esta capacidad, se han desarrollado varios métodos de laboratorio correlacionados con la respuesta del cultivo a la aplicación de N, el consumo de este nutriente por el cultivo, o el rendimiento de grano (Angus et al., 1994; Bushong et al., 2007; Hirzel et al., 2011b; Scott et al., 2005; Sahrawat, 2006; Waring and Bremner, 1964; Wilson et al., 1994). Estos trabajos han generado recomendaciones locales que no pueden ser aplicadas a todos los cultivares o variedades de arroz, sistemas de manejo de cultivo o regiones de cultivo en el mundo.

Desafortunadamente, el manejo del N en los sistemas de siembra directa ha recibido muy poca atención, y el manejo de fertilización, en general, ha sido muy similar a los sistemas de cultivo con inundación permanente (Chen et al., 2018).

Al respecto, estudios reportados por Mahajan et al. (2011) indican que el requerimiento de N en el cultivo de arroz bajo siembra directa es diferente al sistema de cultivo con inundación permanente. Las principales diferencias están relacionadas con el efecto de la saturación del suelo sobre la entrega del N de reserva, la fenología de crecimiento del cultivo, la arquitectura de raíces y la dosis de semilla empleada (Mahajan et al., 2011; 2012). Por ejemplo, Liu et al. (2015) reportaron incrementos significativos en la eficiencia de uso de N para la producción de grano (NUEg), que fluctuaron entre 10,9 % y 47,9 % durante tres temporadas consecutivas para cultivo de arroz en siembra directa, respecto del sistema de inundación permanente. En contraste, Tao et al. (2016) no encontraron diferencias en la NUEg entre ambos sistemas de siembra con una misma dosis de N.

Respecto al manejo óptimo del agua, el sistema de siembra directa genera un considerable ahorro en el uso del recurso hídrico y valores de NUEg mayores al 80 % (Wilson et al., 2000), mientras

que para el sistema de inundación permanente estos valores fluctuaron entre un 30 % y un 40 % (Zheng et al., 2007).

En relación al uso de otros nutrientes, existen diferencias en el manejo entre ambos sistemas de siembra de arroz en función de la zona geográfica. Por ejemplo, en U.S.A. todo el fósforo (P), potasio (K), Azufre (S) y Zinc (Zn) son aplicados como fertilización basal, y el N es aplicado en cualquiera de los siguientes estados: previo a la inundación del cultivo, a media estación entre el inicio de la panícula y diferenciación, o en tres parcialidades, fertilización basal o estado de plántula, previo a la inundación del cultivo y media estación. En Sri Lanka, todo el P es aplicado como fertilización basal, el K es aplicado como fertilización basal o en dos parcializaciones (fertilización basal y estado de panícula), y el N es aplicado en tres o cuatro parcialidades. En Malasia, todo el P y K y 2/3 del N son aplicados a los 15 d después de haber realizado la siembra, y el N faltante es aplicado al estado de inicio de panícula (Kumar y Ladha, 2011).

En Chile, la superficie cultivada con arroz ha fluctuado en los últimos años entre 26 mil y 29 mil ha año⁻¹, de las cuales un 15 % a 20 % son sembradas con el sistema de siembra directa. Para contribuir al conocimiento del manejo de fertilización del cultivo de arroz en siembra directa, se realizó una investigación con dosis crecientes de N, P y K durante dos temporadas consecutivas y en dos localidades representativas de la zona arroceras de Chile. El objetivo fue determinar el efecto de la aplicación de dosis crecientes de N, P y K como experimentos independientes, sobre la producción de grano del nuevo cultivar de arroz 'Digua-CL' (Clearfield) con gran potencial de uso en Chile.

Estudio de caso: fertilización para siembra directa en Chile

El estudio fue realizado en dos suelos arroceros donde se practica monocultivo de arroz, durante las temporadas 2016-2017 y 2017-2018, incluyendo un suelo Alfisol serie Parral (Aquic Haploxeralfs) y un suelo Vertisol serie Quella (Aquic Durixererts) (CIREN, 1997). El clima es del tipo mediterráneo, caracterizado por altas temperaturas, baja pluviometría y temperaturas subóptimas durante el desarrollo del cultivo.

Previo al inicio de los experimentos se colectaron muestras de suelo, desde 0 a 20 cm de profundidad, que fueron analizadas física y químicamente y cuyos resultados se presentan en el Cuadro 1. Para determinar el potencial de suministro de N (mineralización de N amoniacal, N-NH₄⁺) se realizaron incubaciones de suelo en condiciones anaeróbicas, para lo cual se utilizaron 5 g de suelo y 12,5 mL de agua destilada que posteriormente fueron incubados en tubos sin agitación, a 20 °C durante un periodo de 21 d (Hirzel y Stolpe, 2014). El amonio extractado del suelo fue determinado con la adición de 12,5 mL de KCl a los tubos de incubación y mezclado con agitación durante 1 h (Mulnavy, 1996), con posterior filtrado y lectura de N-NH₄⁺ en un equipo Skalar auto-analizador (Espectrofotómetro de flujo segmentado, modelo San Plus System, Holanda).

Los análisis de suelos fueron realizados en el Laboratorio de Suelos de INIA Quilamapu, en Chillán, y los procedimientos analíticos empleados son aquellos descritos por Sadzawka et al. (2006). Todas las muestras fueron secadas al aire y tamizadas a 2 mm.

Para optimizar el crecimiento del cultivo de arroz, las parcelas fueron cultivadas con las prácticas agronómicas estándar utilizadas en Chile, con equipo preparador de suelos convencional a una profundidad de 5 cm. La siembra fue realizada con el sistema de siembra directa, en el cual la semilla de arroz fue sembrada con suelo no inundado y mullido. Las parcelas fueron inundadas a los 45 d después de realizada la siembra, manteniendo un nivel de agua entre 5 y 10 cm hasta el estado de inicio de macolla, y entre 10 a 15 cm hasta la madurez fisiológica del cultivo.

En cada suelo y temporada se desarrollaron tres experimentos de fertilización: 1) respuesta a la aplicación de dosis crecientes de N; 0, 40, 80, 120 y 160 kg de N ha⁻¹; 2) respuesta a la aplicación de dosis crecientes de P; 0, 30, 60 y 120 kg P₂O₅ ha⁻¹; y 3) respuesta a la aplicación de dosis crecientes de K; 0, 30, 60 y 120 kg K₂O ha⁻¹.

Cuadro 1. Propiedades físico químicas (0 a 20 cm de profundidad) de los dos suelos arroceros previo al inicio de los experimentos de fertilización (2016).

Parámetro	Alfisol	Vertisol
Arcilla (%)	31,4	34,4
Limo (%)	31,6	41,3
Arena (%)	37,0	24,3
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1,67	1,78
Porosidad total (%)	37,0	32,8
pH _(suelo:agua 1:5)	6,44	6,30
Materia orgánica (%)	3,11	2,11
N disponible (mg kg ⁻¹)	3,0	4,4
P Olsen (mg kg ⁻¹)	37,3	3,9
K intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	0,22	0,13
Ca intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	11,04	9,29
Mg intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	2,42	5,11
Na intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	0,29	0,30
Al intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	0,02	0,03
S disponible (mg kg ⁻¹)	9,53	1,00
Fe disponible (mg kg ⁻¹)	123,11	95,28
Mn disponible (mg kg ⁻¹)	51,59	81,86
Zn disponible (mg kg ⁻¹)	0,63	0,29
Cu disponible (mg kg ⁻¹)	2,22	2,78
B disponible (mg kg ⁻¹)	0,38	0,03

Para el experimento con dosis crecientes de N, las dosis de P₂O₅ y K₂O fueron de 60 kg ha⁻¹ como superfosfato triple y muriato de potasio, respectivamente, aplicados 100 % al momento de la siembra. El N fue aplicado en tres parcialidades: 33 % al momento de la siembra, 33 % al estado de inicio de macolla y 34 % al estado de inicio de la panícula (Hirzel et al., 2011a). Para el experimento con dosis crecientes de P, todo este nutriente fue aplicado al momento de siembra, y las dosis de K₂O y N fueron de 60 y 120 kg ha⁻¹, respectivamente. Para el experimento con dosis crecientes de K, todo este nutriente fue aplicado al momento de siembra, y las dosis de P₂O₅ y N fueron de 60 y 120 kg ha⁻¹, respectivamente. En estos últimos dos experimentos, el N fue aplicado en tres parcialidades: 33 % al momento de la siembra, 33 % al estado de inicio de macolla y 34 % al estado de inicio de panícula. Para la aplicación de P se usó superfosfato triple, para la aplicación de K se usó muriato de potasio, y para el N se empleó urea.

La variedad de arroz empleada en todos los experimentos fue 'Digua Cl', primera variedad de arroz *japonica* templado de grano largo-ancho, tipo Clearfield en Chile (Paredes et al., 2019). La dosis de semilla usada en todos los experimentos fue 160 kg ha⁻¹ y las fechas de siembra fueron el 14 de octubre para la temporada 2016-2017 y el 15 de octubre para la temporada 2017-2018. El control de malezas se realizó después de la emergencia, con una combinación de los herbicidas penoxsulam (Ricer 240 g L⁻¹), MCPA (MCPA 750 SL 750 g L⁻¹), y bentazon (Basagran 480 g L⁻¹) en dosis de 0,03; 0,19; y 0,72 kg de ingrediente activo (i.a.) ha⁻¹. En todos los experimentos el cultivo fue

cosechado en madurez de grano con un 18 % de humedad, durante el mes de marzo, en ambas temporadas.

Los parámetros evaluados fueron rendimiento de grano y eficiencia de uso agronómico del N (kg de grano producido por kg de N aplicado). Para las evaluaciones de rendimiento se colectaron muestras de 1 x 2 m desde cada parcela. El contenido de humedad en el grano fue determinado con un equipo medidor de humedad Satake modelo SS-5 (Sharma Agrico Industries, West Bengal, India) y el rendimiento de grano fue ajustado a un 14,5 % de humedad (Hirzel et al., 2011b).

Para cada experimento con dosis crecientes de N, P o K se usó un diseño experimental de bloques con arreglo en parcelas sub-divididas, donde la parcela principal correspondió a la localidad (suelo), la sub-parcela correspondió a la temporada, y la sub-sub parcela correspondió a la dosis creciente del nutriente evaluado (N, P o K, Foto 1).

Los resultados fueron sometidos a análisis de varianza. Cuando hubo diferencia significativa entre tratamientos, se empleó el test de Tukey para separar el efecto de cada tratamiento, considerando un 5 % de significancia. El software empleado fue SAS (SAS Institute, 1989). Adicionalmente, cuando hubo interacción entre suelos, temporadas y/o dosis de nutrientes, se realizaron análisis de contrastes para separar efectos de cada suelo, cada temporada y de dosis diferentes de cada nutriente (Hirzel et al., 2011a).

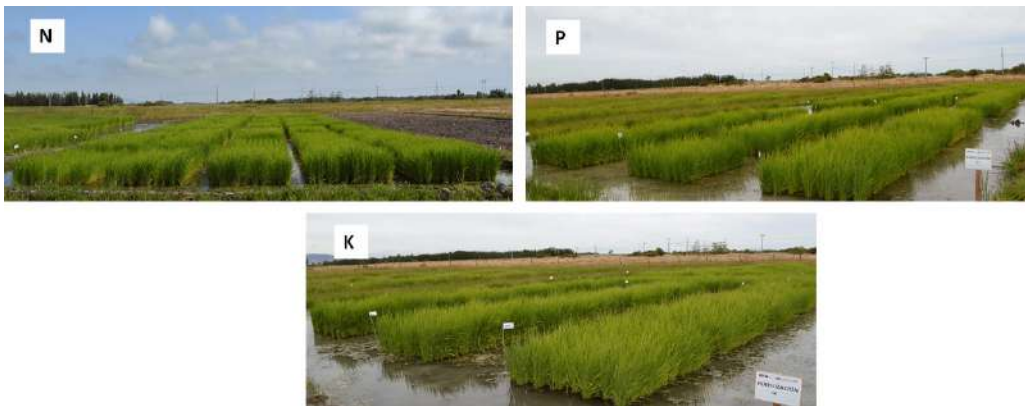


Foto 1. Fertilización de la variedad 'Digua CL' con N, P y K en la localidad de Parral. Temporada 2016-2017.

Resultados y discusión

Propiedades de suelo previo al inicio de los experimentos

Las propiedades físico químicas de cada suelo presentaron pocas limitaciones para el cultivo de arroz (Cuadro 2). Cabe destacar al respecto, una baja concentración de potasio (K) en ambos suelos, y bajas concentraciones de fósforo (P), azufre (S), zinc (Zn) y boro (B) en el suelo Vertisol. También es importante destacar el alto contenido de materia orgánica (MO) y hierro (Fe) disponible en el suelo Alfisol, respecto del suelo Vertisol, en relación al promedio de valores de suelos arroceros de Chile (Hirzel et al., 2011a). Este contenido de MO y Fe disponible están asociados a una mayor capacidad de entrega de N por el suelo, y una probable menor respuesta del cultivo a la aplicación de N (Sahrawat, 2006; Rodríguez de Lima et al., 2008; Hirzel y Stolpe, 2014).

Parámetros agronómicos en el cultivo de arroz

Dosis crecientes de N

Para el experimento con dosis crecientes de N, el análisis estadístico indicó que el rendimiento de grano fue afectado significativamente por el suelo, temporada y dosis de N ($p < 0,01$) (Cuadro 3). Los resultados obtenidos presentaron una interacción significativa entre el suelo y la dosis de N ($p < 0,01$) y el NUAE fue afectado, también significativamente, por el suelo, temporada y dosis de N ($p < 0,01$).

Al comparar entre suelos como promedio de temporadas y dosis de N (Cuadro 4), el mayor rendimiento de grano y NUAE se logró en el suelo Alfisol ($p < 0,05$) con incrementos de rendimiento de grano y NUAE de 1,55 y 18,9 t ha⁻¹, respectivamente, en relación al suelo Vertisol. En tanto, al comparar entre temporadas como promedio de suelos y dosis de N, el mayor rendimiento de grano y NUAE se logró en la temporada 2017-2018 ($p < 0,05$), con incrementos de rendimiento de grano y NUAE de 0,51 y 8,6 t ha⁻¹, respectivamente, en relación a la temporada 2016-2017.

El menor rendimiento de grano obtenido en la temporada 2016-2017 probablemente obedece a las altas temperaturas imperantes durante el estado reproductivo del cultivo (iniciación de panícula), con una temperatura máxima promedio mensual en enero del 2017 de 30,7 °C (San Carlos) y de 33,6 °C (Parral) (Cuadro 1A), y con valores máximos que llegaron a 39 °C y 44 °C para San Carlos (suelo Alfisol) y Parral (suelo Vertisol), respectivamente (datos no mostrados).

Cuadro 1A. Características climáticas de cada localidad, temporadas 2016, 2017 y 2018.

Mes	Alfisol (San Carlos)						Vertisol (Parral)					
	2016		2017		2018		2016		2017		2018	
	Tm	TM	Tm	TM	Tm	TM	Tm	TM	Tm	TM	Tm	TM
Enero	13,0	29,8	12,5	30,7	11,8	28,8	12,4	30,2	13,8	33,6	11,6	31,0
Febrero	11,2	29,5	12,5	29,3	11,7	30,0	11,4	31,8	12,6	31,3	11,9	32,4
Marzo	9,3	27,8	9,1	24,9	8,7	25,3	9,1	30,4	9,3	27,6	8,3	27,8
Abril	7,2	18,6	7,3	21,0	5,7	19,3	6,3	20,3	6,3	23,8	5,1	22,4
Mayo	7,8	16,2	4,1	13,8	5,4	14,9	7,3	18,1	3,9	16,2	4,3	18,2
Junio	1,6	11,3	4,3	11,9	2,1	10,9	0,9	14,0	3,6	13,7	1,3	14,0
Julio	4,0	11,6	2,6	12,2	2,3	12,2	2,7	13,2	1,8	14,5	1,9	14,3
Agosto	4,6	14,4	3,9	12,7	2,9	13,8	3,5	16,9	3,2	14,3	1,9	16,5
Septiembre	5,5	19,6	4,4	16,3	6,1	17,1	3,7	22,1	3,4	18,1	5,6	19,1
Octubre	7,2	20,1	6,4	18,0	6,5	18,4	6,5	22,5	6,0	19,8	5,6	20,2
Noviembre	9,0	25,3	9,0	22,9	9,1	23,1	8,3	27,3	8,5	25,1	8,0	25,9
Diciembre	10,4	26,6	10,7	27,6	10,5	27,2	10,0	28,0	10,7	29,7	9,6	29,4
Promedio	7,6	20,9	7,2	20,1	6,9	20,1	6,8	22,9	6,9	22,3	6,3	22,6

Tm: temperatura mínima (°C); TM: temperatura máxima (°C).

Además, la evapotranspiración de referencia de enero de 2017 fue superior que otras temporadas, con valores de 237,1 mm (San Carlos) y 202,9 mm (Parral) (Cuadro 1B). Al respecto, altas temperaturas (>35 °C) durante estados reproductivos del cultivo de arroz pueden causar esterilidad floral y bajo rendimiento de grano (Wang et al., 2019). En adición, altas temperaturas durante el estado de iniciación de panícula (>38 °C) inducen degeneración de la panícula (Jagadish et al., 2013; Wang et al., 2015; Wu et al., 2017), con daño celular por incremento en la producción de radicales peróxidos (Fu et al., 2015), reducción en el número de espiguillas e inhibición de la formación de anteras (Wang et al., 2016).

Cuadro 1B. Características climáticas de cada localidad, temporadas 2016, 2017 y 2018.

Mes	Alfisol (San Carlos)						Vertisol (Parral)					
	2016		2017		2018		2016		2017		2018	
	pp	ET _o	pp	ET _o	pp	ET _o	pp	ET _o	pp	ET _o	pp	ET _o
Enero	6,3	188,8	2,2	237,1	1,5	188,3	0,9	180,9	0,3	202,9	0,0	181,7
Febrero	0,0	178,7	23,4	156,2	0,1	157,5	0,0	174,3	0,3	134,2	4,5	146,8
Marzo	2,8	139,1	19,2	121,7	3,9	137,3	0,1	130,2	10,4	105,3	16,8	128,8
Abril	78,8	59,9	62,4	73,6	64,4	61,7	61,0	54,2	18,0	69,5	16,7	56,9
Mayo	56,8	31,3	96,2	32,4	89,3	29,7	56,1	27,9	68,2	30,1	36,2	26,1
Junio	14,2	22,5	201,4	39,1	94,2	19,9	8,7	20,8	59,5	23,5	45,2	19,6
Julio	147,2	24,5	92,2	29,9	96,0	27,5	85,8	22,6	100,6	28,4	108,9	26,7
Agosto	46,0	46,9	231,0	38,6	81,0	40,9	14,5	45,6	154,7	38,7	43,0	41,3
Septiembre	11,9	84,4	74,7	69,5	109,4	70,8	7,1	86,1	47,9	70,6	61,2	72,6
Octubre	66,7	103,5	68,3	95,6	77,2	91,2	49,9	106,9	38,6	98,4	46,6	92,9
Noviembre	11,6	160,4	45,0	136,9	65,2	132,8	5,4	152,7	22,2	140,9	17,3	131,3
Diciembre	16,9	174,9	8,9	180,3	14,8	176,5	9,2	164,0	2,3	183,1	1,6	157
Acumulado	459,2	1214,9	924,9	1210,9	729,0	1134,1	298,7	1166,2	523,0	1125,6	398,0	1081,7

pp: precipitación (mm); ET_o: evapotranspiración de referencia (mm).

En general, los valores de rendimiento de grano y NUAE fueron normales para la zona geográfica en la cual se realizaron estos experimentos (Artacho et al., 2009; Hirzel et al., 2011b; Hirzel y Rodríguez, 2016).

El mayor rendimiento obtenido en el suelo Alfisol puede estar asociado a su mayor contenido de MO y Fe disponible (Cuadro 2), parámetros de suelo asociados con el potencial de N mineralizable desde el suelo (Sahrawat, 2006; Rodríguez et al., 2008; Hirzel y Rodríguez, 2016). También se debe mencionar una mayor concentración de S, Zn y B disponible en el suelo Alfisol, que puede permitir la obtención de un mayor rendimiento potencial respecto del suelo Vertisol.

El efecto de interacción suelo x dosis de N sobre el rendimiento de grano (Figura 1A y 1B) indicó una respuesta significativa al aumento en la dosis de N ($p < 0,05$). Para el suelo Alfisol, el mayor rendimiento se logró con la dosis de 120 kg N ha⁻¹ ($p < 0,05$) (Figura 1A). Por su parte, en el suelo Vertisol el mayor rendimiento se logró con la dosis de 160 kg N ha⁻¹ que sólo fue mayor al control sin N y al tratamiento con 40 kg N ha⁻¹ ($p < 0,05$) (Figura 1B). El suelo Vertisol mostró mayor respuesta de incremento de rendimiento, logrando un aumento de 3,6 t ha⁻¹ respecto del control sin N, en tanto que para el suelo Alfisol, este incremento respecto del control sin N fue de sólo 2,2 t ha⁻¹ (Figura 1A). La diferencia de respuesta en estos suelos está asociada a la menor capacidad de mineralización de N del suelo Vertisol (mayor dependencia de la fertilización nitrogenada para maximizar el rendimiento de grano), considerando su menor contenido de MO y Fe disponible (Cuadro 2), anteriormente analizado (Sahrawat, 2006; Rodríguez de Lima et al., 2008; Hirzel y Rodríguez, 2016).

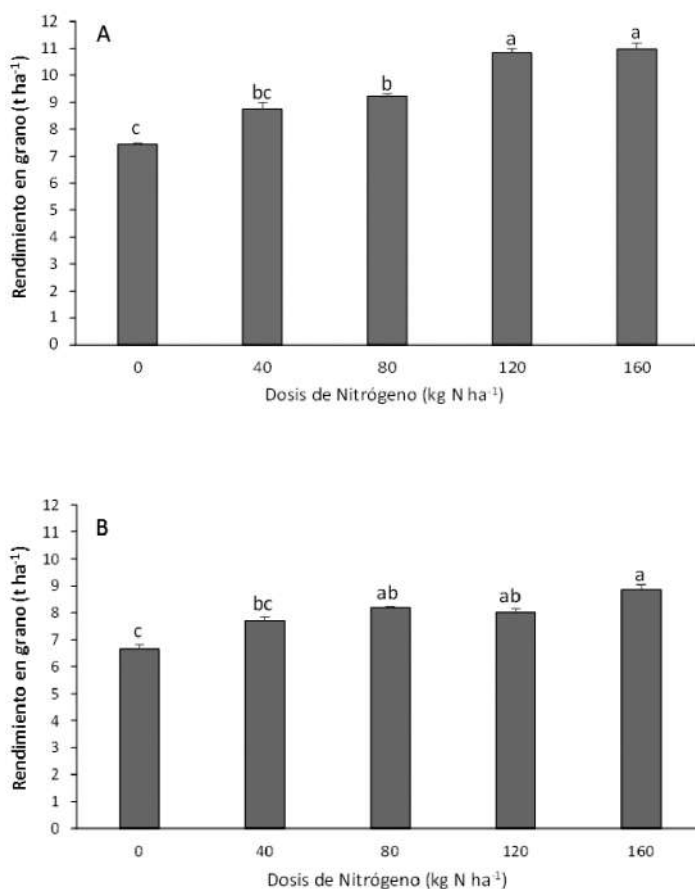


Figura 1. Rendimiento de grano en arroz con dosis crecientes de nitrógeno: A) Alfisol serie Parral y B) Vertisol serie Quella, como promedio de dos temporadas (2016-2017 y 2017-2018). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas de acuerdo al test de Tukey ($p < 0,05$). Las líneas sobre cada barra indican el error estándar de la Media (ES).

La respuesta obtenida a la dosis creciente de N con el sistema de siembra directa en la zona de estudio fue mayor que lo reportado para sistemas de siembra tradicional por algunos autores (Ortega, 2007; Hirzel et al., 2011b; Hirzel y Rodríguez, 2016). Sin embargo, Artacho et al. (2009) reportaron respuesta en rendimiento de grano a dosis de N entre 160 y 200 kg ha⁻¹ para el sistema de siembra tradicional de arroz en la misma zona de estudio, aunque no señalan el número de parcialidades utilizadas.

En relación al NUAE (Figura 2), como promedio de los dos suelos y dos temporadas, como era esperable, se presentó una relación inversamente proporcional entre el NUAE y la dosis de fertilización nitrogenada. Además, hubo una significativa reducción de este valor ($p < 0,05$) con el incremento en la dosis de N, considerando que en los suelos evaluados el mayor rendimiento se logró con dosis entre 120 y 160 kg ha⁻¹ (Alfisol y Vertisol, respectivamente). Los valores de NUAE asociados a estos rendimientos fluctuaron entre 74 y 61 kg de grano producido por kg de N aplicado, para cada dosis de N, respectivamente. Estos valores fueron levemente mayores que los indicados por Thind et al. (2018) para su experimento de arroz en siembra directa con dosis de N entre 120 y 180 kg ha⁻¹, cuyo rendimiento máximo (6,6 t ha⁻¹) fue menor a los obtenidos en el experimento.

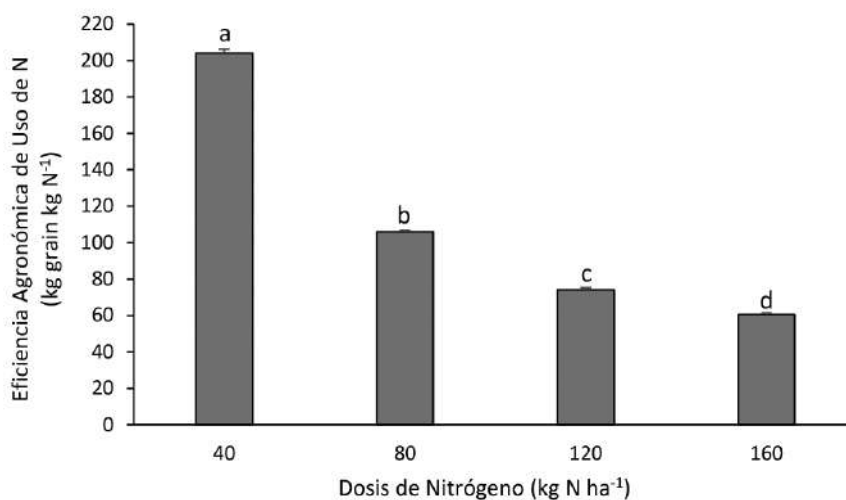


Figura 2. Eficiencia Agronómica de Uso del Nitrógeno (NUAE) con cuatro dosis crecientes de N como promedio de dos suelos (Alfisol serie Parral y Vertisol serie Quella) y dos temporadas (2016-17 y 2017-18). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas, de acuerdo al test de Tukey ($p < 0,05$). Las líneas sobre cada barra indican el error estándar de la Media (ES).

Dosis crecientes de P

El análisis estadístico indicó que el rendimiento de grano fue afectado significativamente por el suelo ($p < 0,05$), temporada y dosis de P ($p < 0,01$) (Cuadro 3). Sin embargo, hubo interacción significativa entre el suelo y la dosis de P ($p < 0,01$), y entre la temporada y la dosis de P ($p < 0,01$).

Cuadro 3. Análisis de significancia de rendimiento de grano para los experimentos con dosis crecientes de nitrógeno, fósforo y potasio, y para la eficiencia agronómica de uso de nitrógeno (NUAE) en el experimento de dosis crecientes de nitrógeno.

Parámetro	Suelo	Temporada	Dosis N	Interacción	Interacción	Interacción	Interacción *
	(S)	(T)	(N)	S x T	S x N	T x N	T x N
Rendimiento	**	**	**	NS	**	NS	NS
NUAE	**	**	**	NS	NS	NS	NS
	Suelo	Temporada	Dosis P	Interacción	Interacción	Interacción	Interacción
	(S)	(T)	(P)	S x T	S x P	T x P	S x T x P
Rendimiento	*	**	**	**	NS	**	NS
	Suelo	Temporada	Dosis K	Interacción	Interacción	Interacción	Interacción
	(S)	(T)	(K)	S x T	S x K	T x K	S x T x K
Rendimiento	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

* Significativo a $p < 0,05$; ** Significativo a $p < 0,01$; NS: no significativo.

Al comparar entre suelos como promedio de temporadas y dosis de P (Cuadro 4), el mayor rendimiento de grano se logró en el suelo Alfisol ($p < 0,05$), con incrementos de rendimiento de grano de $0,37 \text{ t ha}^{-1}$, respecto al suelo Vertisol. Esto fue coincidente con lo obtenido en el experimento de dosis crecientes de N. Por su parte, al comparar entre temporadas como promedio de suelos y dosis de P, el mayor rendimiento de grano se logró en la temporada 2016-2017 ($p < 0,05$), con incrementos de rendimiento de grano de $0,76 \text{ t ha}^{-1}$ respecto a la temporada 2017-2018. Este resultado contrasta con lo obtenido para el experimento con dosis crecientes de N. Sin embargo, se debe considerar que, para el experimento de dosis crecientes de P, se usó una misma dosis de N de 120 kg ha^{-1} , en tanto que en el experimento de dosis crecientes de N se utilizaron diferentes dosis que, como promedio de los tratamientos, fueron de 80 kg ha^{-1} , lo cual pudo haber reducido el rendimiento potencial del cultivo en este sistema de siembra directa (Mahajan et al., 2011; 2012). Como se puede corroborar en el Cuadro 4, el rendimiento promedio de los suelos o temporadas fue de $8,67$ y $9,36 \text{ Mg ha}^{-1}$ en los experimentos con dosis crecientes de N y P, respectivamente.

Cuadro 4. Rendimiento de grano en arroz en dos suelos y dos temporadas como promedio de diferentes dosis de N y P, y eficiencia de uso agronómico de nitrógeno (NUAE) en dos suelos y dos temporadas como promedio de diferentes dosis de nitrógeno.

Experimento	Parámetro	Suelo		Temporada	
		Alfisol	Vertisol	2016-2017	2017-2018
Dosis crecientes de N	Rendimiento (t ha^{-1})	9,44 a*	7,89 b	8,41 b	8,92 a
	NUAE	123,2 a	104,3 b	109,5 b	118,1 a
Dosis crecientes de P	Rendimiento (t ha^{-1})	9,17 b	9,54 a	9,74 a	8,98 b

*Letras distintas en una misma fila indican diferencias significativas entre suelos o temporadas, de acuerdo al test de Tukey ($p < 0,05$).

Las dosis crecientes de P en el suelo Alfisol durante ambas temporadas (Figura 3A y 3B) no tuvieron efecto significativo sobre el rendimiento de grano ($p > 0,05$). Por su parte, las dosis crecientes de P en el suelo Vertisol durante ambas temporadas (Figura 4A y 4B) sólo afectaron el rendimiento de grano en la temporada 2016-2017 ($p < 0,05$) (Figura 4A). En este suelo y en la temporada 2016-2017, el menor rendimiento de grano se obtuvo en el control sin P ($p < 0,05$), sin diferencias entre los tratamientos, en los cuales se aplicó diferentes dosis de P ($p > 0,05$).

La respuesta encontrada a la aplicación de P en el suelo Vertisol para la primera temporada de evaluación, puede estar asociada a la baja concentración de este nutriente en el suelo (Cuadro 2), en tanto que en suelo Alfisol era esperable la ausencia de respuesta a la adición de P, considerando la alta concentración de P disponible en el suelo al inicio de los experimentos. No obstante, en el suelo Vertisol se habría esperado respuesta a la aplicación de P durante la segunda temporada de evaluación, efecto no encontrado (Figura 4B), a pesar que los rendimientos promedio en este suelo fueron similares entre temporadas ($9,52$ y $9,56 \text{ t ha}^{-1}$ en las temporadas 2016-2017 y 2017-2018, respectivamente). Al respecto, Frageria et al. (2011) indican que el ambiente anaeróbico generado en suelos sometidos a inundación produce cambios en la rizósfera, con disminución en las reacciones de óxido-reducción del suelo que finalmente se traduce en mayor disponibilidad de P y de otros nutrientes.

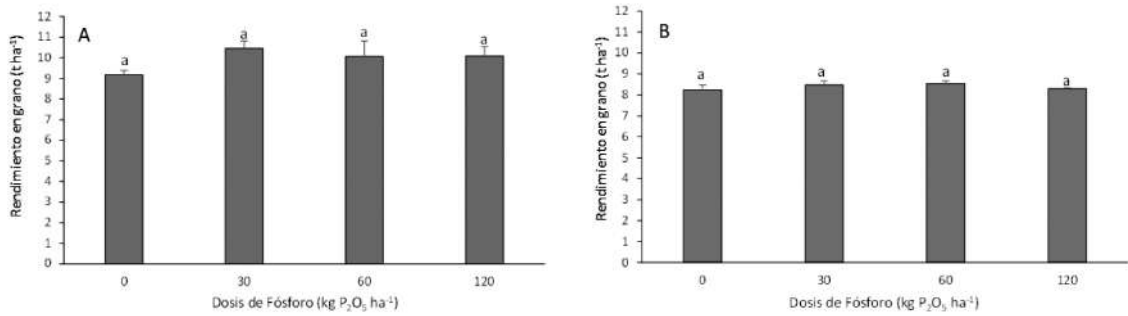


Figura 3. Rendimiento de grano en arroz con dosis crecientes de fósforo en el suelo Alfisol (serie Parral) para las temporadas: A) 2016-2017, y B) 2017-2018. Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas, de acuerdo al test de Tukey ($p < 0,05$). Las líneas sobre cada barra indican el error estándar de la Media (ES).

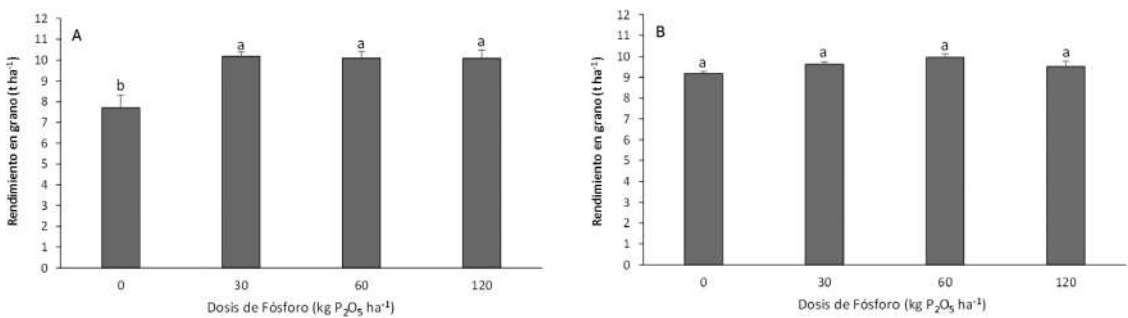


Figura 4. Rendimiento de grano en arroz con dosis crecientes de fósforo en el suelo Vertisol (serie Quella) para las temporadas: A) 2016-2017 y B) 2017-2018. Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas, de acuerdo al test de Tukey ($p < 0,05$). Las líneas sobre cada barra indican el error estándar de la Media (ES).

Conclusiones y recomendaciones

El cultivo de arroz realizado en siembra directa presentó una respuesta positiva a la aplicación de dosis crecientes de nitrógeno en los dos suelos arroceros evaluados (Alfisol serie Parral y Vertisol serie Quella). Sin embargo, la respuesta a la aplicación de fósforo fue muy baja y sólo se presentó en el suelo Vertisol, y no hubo respuesta a la aplicación de potasio en ninguno de los suelos arroceros.

Las dosis de nitrógeno que permitieron obtener los mayores rendimientos de grano en el cultivo de arroz, fueron de 120 kg ha⁻¹ en el suelo Alfisol y de 160 kg ha⁻¹ en el suelo Vertisol. Los valores de eficiencia de uso agronómico de nitrógeno (NUAE), asociados a estas dosis de nitrógeno, fueron de 74 y 61 kg de grano producido por kg de nitrógeno aplicado, respectivamente.

Por último, con los resultados anteriores y en base a la experiencia de conocimiento de las propiedades químicas de los suelos arroceros de Chile, se presentan los Cuadros 5 y 6, con recomendaciones de dosis de nutrientes a usar en el cultivo de arroz en función de diferentes niveles de fertilidad de suelo, para escenarios de rendimiento alto y medio.

Cuadro 5. Guía de fertilización del cultivo de arroz en condiciones de siembra directa en suelos de las Regiones del Maule y Ñuble, para un rendimiento potencial alto (7,1 a 10,0 t ha⁻¹).

Nutriente a aplicar	Parámetro de suelo o de manejo usado como indicador de dosis	Valor de referencia usado en la recomendación	Dosis referencial del nutriente (kg ha ⁻¹)
N*	N mineralizable (mg kg ⁻¹)	< 20	170 – 180
		21 – 40	140 – 160
		> 41	100 – 130
P ₂ O ₅ **	P Olsen (mg kg ⁻¹)	< 5	55 – 60
		6 – 12	45 – 50
		> 12	30 – 40
K ₂ O**	K intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	< 0,3	55 – 60
		0,3 – 0,5	35 – 50
		> 0,5	0 – 30
CaCO ₃ ***	pH	< 5,5	1.000 – 2.000
		5,5 - 6,0	0 – 1.000
		> 6,0	0
MgO****	Mg intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	< 0,8	15 – 20
		0,8 – 1,2	10 – 15
		> 1,2	0 – 10
S	S disponible (mg kg ⁻¹)	< 8	15 – 20
		8 – 12	10 – 15
		> 12	0 – 10
B	B disponible (mg kg ⁻¹)	< 0,5	1 – 1,5
		0,5 – 1	0,5 – 1
		> 1	0 – 0,5
Zn	Zn disponible (mg kg ⁻¹)	< 0,5	1 – 1,5
		0,5 – 1	0,5 – 1
		> 1	0 – 0,5

*El N debe ser parcializado en 2 o 3 momentos durante el cultivo (siembra e inicio de panícula, o siembra, inicio de macolla e inicio de panícula) para maximizar la eficiencia de uso de este nutriente y maximizar el rendimiento del cultivo de arroz.

**En el caso de haber incorporado residuos, se puede usar entre 60 % y 70 % de la dosis sugerida para P y entre 30 % y 40 % de la dosis sugerida para K.

***La dosis de CaCO₃ corresponde a carbonato de calcio puro. Debe ser convertido a cal comercial, de acuerdo al poder relativo de neutralización (PRNT) del producto utilizado.

****Para el MgO, en el caso de encalar usando CaCO₃*MgCO₃ (Magnecal), el aporte de MgO de la Magnecal en cualquier dosis que permita corregir pH, supera la dosis referencial de MgO indicada en este cuadro, por lo tanto, no es necesario aplicar MgO en la mezcla de siembra.

Cuadro 6. Guía de fertilización del cultivo de arroz en condiciones de siembra directa en suelos de las Regiones del Maule y Ñuble, para un rendimiento potencial medio (5 a 7 t ha⁻¹).

Nutriente a aplicar	Parámetro de suelo o de manejo usado como indicador de dosis	Valor de referencia usado en la recomendación	Dosis referencial del nutriente (kg ha ⁻¹)
N*	N mineralizable (mg kg ⁻¹)	< 20	140 – 160
		21 – 40	120 – 130
		> 41	100 – 110
P ₂ O ₅ **	P Olsen (mg kg ⁻¹)	< 5	45 – 50
		6 – 12	35 – 40
		> 12	20 – 30
K ₂ O**	K intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	< 0,3	45 – 50
		0,3 – 0,5	35 – 40
		> 0,5	0 – 30
CaCO ₃ ***	pH	< 5,5	1.000 – 2.000
		5,5 - 6,0	0 – 1.000
		> 6,0	0
MgO****	Mg intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	< 0,8	12 – 15
		0,8 – 1,2	8 – 12
		> 1,2	0 – 8
S	S disponible (mg kg ⁻¹)	< 8	12 – 15
		8 – 12	8 – 12
		> 12	0 – 8
B	B disponible (mg kg ⁻¹)	< 0,5	0,8 – 1,2
		0,5 – 1	0,4 – 0,8
		> 1	0 – 0,4
Zn	Zn disponible (mg kg ⁻¹)	< 0,5	0,8 – 1,2
		0,5 – 1	0,4 – 0,8
		> 1	0 – 0,4

*El N debe ser parcializado en 2 o 3 momentos durante el cultivo (siembra e inicio de panícula, o siembra, inicio de macolla e inicio de panícula) para maximizar la eficiencia de uso de este nutriente y maximizar el rendimiento del cultivo de arroz.

**En el caso de haber incorporado residuos se puede usar entre 60 % y 70 % de la dosis sugerida para P y entre 30 % y 40 % de la dosis sugerida para K.

***La dosis de CaCO₃ corresponde a carbonato de calcio puro. Debe ser convertido a cal comercial de acuerdo al poder relativo de neutralización (PRNT) del producto utilizado.

****Para el MgO, en el caso de encalar usando CaCO₃*MgCO₃ (Magnecal), el aporte de MgO de la Magnecal en cualquier dosis que permita corregir pH, supera la dosis referencial de MgO indicada en este cuadro, por lo tanto, no es necesario aplicar MgO en la mezcla de siembra.

Referencias

- Angus, J.F., Ohnishi, M, Horie, T., et al. 1994. A preliminary study to predict net nitrogen mineralization in a flooded rice soil using anaerobic incubation. *Aust. J. Exp. Agric.* 34:995-999.
- Artacho, P., Bonomelli, C., Meza, F. 2009. Nitrogen application in irrigated rice growth in Mediterranean conditions: Effects on grain yield, dry matter production, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency. *J. Plant Nutr. (Jpn.)* 32:1574-1593.
- Bouman, B., Humphreys, E., Tuong, T.P., et al. 2007. Rice and water. *Adv. Agron.* 92:187-237.
- Bushong, J.T., Norman, R.J., Ross, W.J., et al. 2007. Evaluation of several indices of potentially mineralizable soil nitrogen. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38:2799-2813.
- CIREN. 1997. Descripción de suelos, materiales y símbolos, estudio agrológico VII Región. Publicación N°117. 659 p. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Santiago, Chile.
- Chauhan, B.S., Mahajan, G., Sardana, V., et al. 2012. Productivity and sustainability of the rice-wheat cropping system in the Indo-Gangetic Plains of the Indian subcontinent: problems, opportunities, and strategies. *Adv. Agron.* 117:315-369.
- Chen, Q., Peng, S., Dong, H., et al. 2018. Optimal nitrogen fertilizer management for direct seeding rice: A review. *Int. J. Agri. Biol.* 20:1382-1390.
- FAO. 2004. Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH₃, NO y N₂O provenientes de las tierras agrícolas. FAO, Roma, Italia.
- Frageria, N.K., Carvalho, G.D., Santos, A.B., et al. 2011. Chemistry of Lowland Rice Soils and Nutrient Availability. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 42:1913-1933.
- Fu, G.F., Zhang, C.X., Yang, X.Q., et al. 2015. Action mechanism by which SA alleviates high temperature-induced inhibition to spikelet differentiation. *Chin. J. Rice Sci.* 29:637-647.
- Hirzel, J., Cordero, K., Fernández, C., et al. 2011b. Soil potentially mineralizable nitrogen and its relation to rice production and nitrogen needs in two paddy rice soils of Chile. *J. Plant Nutr. (Jpn.)* 35:396-412.
- Hirzel, J., Pedreros, A., Cordero, K. 2011a. Effect of nitrogen rates and split nitrogen fertilization on grain yield and its components in flooded rice. *Chil. J. Agric. Res.* 71:437-444.
- Hirzel, J., Rodríguez, F. 2016. Response of rice to increasing nitrogen rates in five soils with different mineralizable nitrogen levels. *J. Plant Nutr. (Jpn.)* 40(3):382-390.
- Hirzel, J., Stolpe, N. 2014. Anaerobic incubation without shaking over a prolonged period as a method to determine mineralizable nitrogen in rice soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 46:2018-2032.
- Huang, J., He, F., Cui, K., et al. 2008. Determination on optimal nitrogen rate for rice varieties using a chlorophyll meter. *Field Crops Res.* 105:70-80.
- Jagadish, S.V.K., Craufurd, P., Shi, W., et al. 2013. A phenotypic marker for quantifying heat stress impact during microsporogenesis in rice (*Oryza sativa* L.) *Funct. Plant Biol.* 41:48-55.
- Jing, Q., Bouman, B., van Keulen, H., et al. 2008. Disentangling the effect of environmental factors on yield and nitrogen uptake of irrigated rice in Asia. *Agric. Syst.* 98(3):177-188.
- Juliano, B.O. 1993. Rice in human nutrition. FAO Food and Nutrition Series N°26. FAO, Rome, Italy/ International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines.
- Khan, A.W., Mann, R.A., Saleem, M., et al. 2012. Comparative rice yield and economic advantage of foliar KNO₃ over soil applied K₂SO₄. *Pak. J. Agric. Sci.* 49:481-484.
- Kumar, V., Ladha, J.K. 2011. Direct seeding of rice: recent developments and future research needs. *Adv. Agron.* 111:297-413.

- Li, D., Fan, X., Hu, F., et al. 2007. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake Region, China. *Pedosphere* 17(5):639-645.
- Liu, H., Hussain, S., Zheng, M., et al. 2015. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China. *Agron. Sust. Dev.* 35:285-294.
- Mahajan, G., Chauhan, B.S., Gill, M.S. 2011. Optimal nitrogen fertilization timing and rate in dry-seeded rice in northwest India. *Agron. J.* 103:1676-1682.
- Mahajan, G., Chauhan, B.S., Gill, M.S. 2013. Dry-seeded rice culture in Punjab state of India: lessons learned from farmers. *Field Crops Res.* 144:89-99.
- Mahajan, G., Chauhan, B.S., Timsina, J., et al. 2012. Crop performance and water-and nitrogen-use efficiencies in dry-seeded rice in response to irrigation and fertilizer amounts in northwest India. *Field Crops Res.* 134:59-70.
- Mulnavey, L.R. 1996. Nitrogen Inorganic forms. p. 1123-1184. In Bartels, J.M. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods.* American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Ortega, R. 2007. Analysis of factors affecting spikelet sterility in flooded rice under field conditions in Chile. *Arch. Agron. Soil Sci.* 53:183-192.
- Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2019. Digua CI, primera variedad de arroz Clearfield para Chile. p. 18-25. En Becerra, V., Paredes, M., Donoso, G. (eds.) *Sistema de producción de arroz Clearfield.* Boletín INIA N°397. 52 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.
- Rodriguez de Lima, A., Hoogmoed, W., Brussaard, L. 2008. Soil quality assessment in rice production systems: establishing a minimum data set. *J. Environ. Qual.* 37:623-630.
- Sadzawka, A., Carrasco, M.A., Grez, R., et al. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Serie Actas INIA N°34. 164 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile.
- Sahrawat, K. 2006. Organic matter and mineralizable nitrogen relationships in wetland rice soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37:787-796.
- SAS Institute. 1989. Usage and reference. Version 6. 501 p. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.
- Scott, D., McLarren, A., Burger, J. 2005. Rapid indices of potential nitrogen mineralization for intensively managed hardwood plantations. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36:1421-1434.
- Tao, Y., Chen, Q., Peng, S., et al. 2016. Lower global warming potential and higher yield of wet direct-seeded rice in Central China. *Agron. Sustain. Dev.* 36:1-9.
- Thind, H.S., Yadvinder-Singh, Sharma, S., et al. 2018. Optimal rate and schedule of nitrogen fertilizer application for enhanced yield and nitrogen use efficiency in dry-seeded rice in north-western India. *Arch. Agron. Soil Sci.* 64:196-207.
- Wang, Y., Wang, L., Zhou, J., et al. 2019. Research progress on heat stress of rice at flowering stage. *Rice Sci.* 26:1-10.
- Wang, Y.L., Zhang, Y.P., Zeng, Y.H., et al. 2015. Effect of high temperature stress on rice spikelet differentiation and degeneration during panicle initiation stage. *Chin. J. Agron.* 36:724-731.
- Wang, Y.L., Zhang, Y.P., Zhu, D.F., et al. 2016. Effect of heat stress on spikelet degeneration and grain filling at panicle initiation period of rice. *Acta Agron. Sin.* 42:1402-1410.
- Waring, S.A., Bremner, J.M. 1964. Ammonium production in soil under water-logged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature* 202:951-952.
- Wienhold, B. 2007. Comparison of laboratory methods and an *in-situ* method for estimating nitrogen mineralization in an irrigated silt-loam soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38:1721-1732.

- Wilson, C.E., Norman, R.J., Wells, B.R. 1994. Chemical estimation of nitrogen mineralization in paddy rice soils: I. Comparison to laboratory indices. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25(56):573-590.
- Wilson, C., Slaton, N., Norman, R., et al. 2000. Efficient use of fertilizer. In *Rice production handbook*. Cooperative Extension Service. Chapter 8:51-74. University of Arkansas, Division of Agriculture, Little Rock, Arkansas, USA.
- Wu, C., Cui, K.H., Wang, W.C., et al. 2017. Heat-induced cytokinin transportation and degradation are associated with reduced panicle cytokinin expression and fewer spikelets per panicle in rice. *Front. Plant Sci.* 8:371.
- Ying, J. S., Peng, G., Yang, N., et al. 1998. Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments – II. Nitrogen accumulation and utilization efficiency. *Field Crops Res.* 57:85-93.
- Zhang, Y., Zhu, D., Xiong, H., et al. 2012. Development and transition of rice planting in China. *Agric. Sci. Technol.* 13:1270-1276.
- Zheng, Y.M., Ding, Y.F., Wang, Q.S., et al. 2007. Effect of nitrogen applied before transplanting on NUE in rice. *Agric. Sci. Chin.* 6:842-848.