



TESIS FINAL DE GRADUACIÓN:

Relación entre el índice de verdor y nitrógeno disponible en maíz en diferentes ambientes de la región semiárida pampeana

Autores: Ramiro Bagnato y Diego Forestello

Director: Elke Noellemeyer

Co-director: Román Trucco

Introducción

En la región semiárida pampeana las precipitaciones no logran cubrir los requerimientos de uso consuntivo de los cultivos y normalmente limitan el rendimiento, lo que se le suma la baja capacidad de retención de agua de sus suelos. Por eso es necesario hacer un buen manejo del agua contemplando su captación, almacenamiento y eficiencia de uso por parte del cultivo.

En los últimos tiempos se ha enfocado a una agricultura de precisión que tiene implícito el concepto de sitio específico, que fue definido por Whelan y Mc Bratney (2000) como la ***“Adecuación de la aplicación de recursos y de prácticas agronómicas a los requerimientos de suelo y cultivos tal como estos varían en el espacio y el tiempo dentro de un potrero”***.

El principal aspecto a tener en cuenta en nuestra región, para realizar un manejo diferencial, es la disponibilidad hídrica del perfil. El agua mantiene turgente las plantas permitiendo que se lleven a cabo todas las reacciones metabólicas y es el medio por el cual ingresan los nutrientes. Uno de los principales nutrientes es el nitrógeno (N) que está disponible en forma de nitrato (NO_3^-). En esta región se observan bajos niveles de este elemento tan esencial, ya sea por las propias características del ambiente, como por los continuos laboreos en los primeros centímetros del suelo. Con mayores niveles de N orgánico podremos tener N en el perfil, que en general se encuentran a niveles altos a la siembra del cultivo y luego descienden a la cosecha (Bono y Romano, 2007).

Una adecuada nutrición nitrogenada es imprescindible para que el cultivo de maíz alcance un óptimo crecimiento y altos rendimientos. En la región pampeana semiárida y subhúmeda, el N

es el nutriente que influye en mayor medida sobre la productividad de este cereal (Echeverría *et al.*, 2000).

Por lo expuesto anteriormente, una de las prácticas de manejo a tener en cuenta es la fertilización nitrogenada. En el caso del maíz, generalmente, se hace una aplicación a la siembra o a V₆-V₈ ó fraccionando la dosis entre estos dos momentos (Bono y Romano, 2007).

Antes de decidir la fertilización se debe diagnosticar el N disponible en el sistema suelo. Las formas de llevar a cabo el diagnóstico son variables, entre ellas tenemos los análisis en planta, como son: el análisis foliar, N total en planta, NO₃⁻ en el jugo de la base de los tallos, y el de nuestro interés, índice de verdor, entre otros (García, 2008).

En general, los métodos de diagnóstico para la fertilización nitrogenada pretenden predecir la probabilidad de respuesta a partir de la disponibilidad de N en suelo y/o en planta y el requerimiento previsto para un determinado nivel de rendimiento. Los métodos desarrollados para el cultivo de maíz incluyen el análisis de suelo en pre-siembra y al estado de 5-6 hojas de desarrollo del cultivo y el análisis de planta en estadios tempranos y avanzados de desarrollo (García, 1999).

En la medición del índice de verdor de las hojas, generalmente, se usa un dispositivo denominado Minolta SPAD 502. El índice se correlaciona con el contenido de clorofila y de N de las hojas. Las determinaciones son sencillas, rápidas y confiables.

Ferrari *et al.* (2000) en Pergamino no encontraron relaciones ajustadas entre el índice de verdor en V5-7 y el rendimiento. En determinaciones realizadas en el sudeste de Buenos Aires, Sainz Rozas y Echeverría (1997) encontraron que la sensibilidad de las mediciones no es lo suficientemente elevada al estado 5-6 hojas desarrolladas para diferenciar niveles contrastantes de disponibilidad de N. En estados más avanzados del ciclo (en el período 15 días pre-floración y 15 días post-floración), los valores del índice de suficiencia de N oscilaron entre 0.97-0.98 para lograr el 95% del rendimiento máximo del cultivo.

También se encontraron respuestas relacionadas con la disponibilidad de N en pre-siembra, y la concentración de N en jugo de base de tallos al estado de 5-6 hojas desarrolladas (V5-6), pero no con el índice de verdor (Minolta SPAD 502) en V₅-V₆ y floración (Thomas *et al.*, 2001).

El objetivo de este de trabajo es la evaluación del nitrógeno en planta mediante el índice de verdor registrado por el Minolta SPAD 502 sobre el N disponible en el suelo, en tratamientos con alta y baja densidad, con y sin fertilización, situados en dos ambientes diferentes, loma y bajo.

Como hipótesis se plantea que la fertilización nitrogenada acompañada de condiciones de humedad edáfica óptimas mejora la disponibilidad de N, por consiguiente el índice de verdor de la planta de maíz se verá afectado positivamente, reflejándose en el rendimiento.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló en el establecimiento "El Maijú" (Tebolares, Dpto. Maracó, La Pampa) ubicado en las siguientes coordenadas geográficas: Latitud Sur de 35°34'30.95" y Longitud Oeste de 63°31'23.34", y con una altitud de 117 m.s.n.m. El lote de producción tiene una historia de varios años de uso agrícola sobre todo con cultivos de soja y muestra signos de degradación del suelo. Se delimitaron dos ambientes (loma y bajo) sobre este suelo Haplustol éntico, característico de la región semiárida-subhúmeda pampeana.

Especificaciones de cultivo:

1. Cultivo: Maíz.
2. Híbrido: KWS Quelu.
3. Tipo de híbrido: Duro.
4. Ciclo: Intermedio Largo.
5. Color Grano: Colorado.

Diseño del experimento:

Se contemplaron tres factores en el diseño de los ensayos:

1. Ambiente: L = loma; B = bajo.
2. Fertilización: $F_1 = 0\text{Kg N}$; $F_2 = 100\text{Kg N}$.
3. Densidad de plantas: $D_1 = 75000$ plantas/ha; $D_2 = 95000$ plantas/ha.

Se utilizó un diseño experimental en bloques completamente aleatorizados sembrados en franjas con cuatro repeticiones, y parcelas divididas por el factor ambiente. El ancho de parcela estuvo determinado por el ancho de la sembradora (14 surcos x 0,525 m. = 7,35 m.), mientras que el largo fue de 300m, atravesando las diferencias topográficas.

Plano de la parcela:

Bloque 1				Bloque 2				Bloque 3				Bloque 4			
							Loma								
D ₂	D ₂	D ₁	D ₁	D ₂	D ₂	D ₁	D ₁	D ₁	D ₂	D ₁	D ₂	D ₂	D ₁	D ₁	D ₂
F ₂	F ₁	F ₁	F ₂	F ₂	F ₁	F ₁	F ₂	F ₂	F ₂	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁	F ₂	F ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
							Bajo								
													N →		

Caracterización de ambientes:

El ambiente de loma se caracterizó por un suelo de textura franca arenosa, con bajos contenidos de materia orgánica (MO), valores medios a bajos de fósforo (P), con valores altos de densidad aparente (DA) (Tabla 1) y con presencia de una capa de calcáreo (“tosca”) a una profundidad variable de entre 100 y 170 cm. Además se observó el efecto de sales en el perfil, medidos a través de su conductividad eléctrica (CE) en superficie.

Tabla 1: Ambiente de loma: Descripción de los horizontes y su espesor, fracciones de arcilla (A), limo (L) y arena, contenidos de materia orgánica (MO) y fósforo (P), densidad aparente (DA) y capacidad de campo (CC), pH y conductividad eléctrica (CE) y punto de marchitez permanente (PMP) (Spaw Model with Soil Water Characteristics, USDA).

Horizonte	Profundidad	Arcilla	Limo	Arena	MO	MO/ L+A	pH	CE	DA	P	CC	PMP
	cm	%						dSm m ⁻¹	g/cm ³	ppm	%	
Ap	0-25	8,1	23,6	68,3	1,08	3,4	6,5	1,1	1,52	11,52	16,2	6,9
Ac	25-42	10,1	16,6	73,3	0,59	2,2	6,1	0,5	1,60	5,52	16,1	8,1
C1	42-76	9,1	12,6	78,3	0,26	1,2	7,7	3,6	1,58	1,36	14,5	8,3
C2	76-145	7,1	13,6	79,3	0,13	0,6	8,8		1,57	0,98	13,3	7,3

Al momento de la siembra de los cultivos la napa freática se encontraba a una profundidad de 360 cm con valores de CE de 6 dS m⁻¹ y pH de 8,1.

El ambiente de bajo se caracterizó por un suelo de textura franca, con contenidos medios de MO, valores elevados de P, y con valores altos de densidad aparente (DA) (Tabla 2). También se observó una alta CE desde la superficie y elevado valores de pH.

Tabla 2: Ambiente de bajo: Descripción de los horizontes y su espesor, fracciones de arcilla (A), limo (L) y arena, contenidos de materia orgánica (MO) y fósforo (P), densidad aparente (DA), pH y conductividad eléctrica (CE) y capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) (Spaw Model with Soil Water Characteristics, USDA).

Horizonte	Profundidad	Arcilla	Limo	Arena	MO	MO/ L+A	pH	CE	DA	P	CC	PMP
	cm	%						dSm m ⁻¹	g cm ⁻³	ppm	%	
Ap	0-15	11,1	37,6	51,3	2,06	4,2	6,3	0,65	1,22	33,9	20,9	8,5
A2	15-30	13,1	33,6	53,3	0,39	0,8	8,1	0,37	1,48	21,7	21,4	9,5
AC	30-58	11,1	17,6	71,3	0,34	1,2	8,6	0,32	1,63	31,9	16,4	8,2
C1	58-76	12,1	21,6	66,3	0,18	0,5	9,1	0,36	1,77	28,5	15,7	7,3
C2	+ 76	9,1	22,6	68,3	0,10	0,3	9,2	0,45	1,65	23,1	13,4	5,5

La napa freática se encontraba a una profundidad de 160 cm con valores de CE de 7,5 dSm m⁻¹ y pH de 7,4.

Pluviometría:

En la Tabla 3 se presentan los registros decádicos de lluvia desde el 1 de noviembre de 2009 hasta el 31 de marzo de 2010.

Tabla 3: Precipitaciones por décadas y mensuales durante el ciclo de del cultivo y promedios históricos (mm)(General Pico, La Pampa, 1961-2006).

Mes	Noviembre			Diciembre			Enero			Febrero			Marzo		
	Déc.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
mm	5	71	95	0	55	153	10	35	105	32	12	9	30	0	0
mm/mes	171			208			150			53			30		
mm/mes histórico	93,4			113,2			106,6			95			125,4		

Determinaciones en el cultivo:

Durante todas las etapas de crecimiento y desarrollo del cultivo se llevó el registro de los estadios fenológicos, describiéndose a continuación en la tabla 4:

Tabla 4: Fenología de maíz de acuerdo a la escala de Ritchie y Hanway.

E	V ₁	V ₃	V ₆	V ₇	V ₉	V _T	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
30 Oct	18 Nov	29 Nov	18 Dic	24 Dic	31 Dic	6 Ene	13 Ene	19 Ene	30 Ene	26 Feb	15 Mar

En el momento de la siembra de maíz y en los diferentes estadios fenológicos se determinó el contenido de agua total del suelo (AT) por método gravimétrico y N (NO₃⁻) por extracción con agua destilada y sulfato de calcio y valoración colorimétrica, a las profundidades de 20, 50 y 120 cm.

A partir de los valores de capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PMP) y DA que figuran en las Tablas 1 y 3 y el agua total (AT) se calcularon los contenidos de agua útil (AU) y de agua disponible (AD) según las ecuaciones [1] y [2].

$$AU \text{ (mm)} = [CC \text{ (g kg}^{-1}) - PMP \text{ (g kg}^{-1})] \times DA \text{ (mg kg}^{-1}) \times \text{espesor (mm)} \dots\dots\dots [1]$$

$$AD \text{ (mm)} = [AT \text{ (g kg}^{-1}) - PMP \text{ (g kg}^{-1})] \times DA \text{ (mg kg}^{-1}) \times \text{espesor (mm)} \dots\dots\dots [2]$$

En R_2 se midió el índice de verdor en las últimas hojas expandidas, en cinco plantas representativas tomadas al azar en cada parcela mediante lecturas de Minolta SPAD 502, que fueron promediadas por el mismo aparato para obtener un dato por parcela.

En madurez fisiológica se determinó materia seca (MS) por hectárea producida por el cultivo. Se realizó cortando la planta entera en una superficie de 1 m^2 y luego llevado a estufa a peso constante.

A madurez de cosecha se efectuó la recolección de las espigas en una superficie de 1 m^2 que se trillaron para calcular el rendimiento de grano.

Manejo de cultivo:

El ensayo se realizó bajo siembra directa sobre un rastrojo de soja, el cual se encontraba con muy baja cobertura. No se realizó barbecho químico ya que no se registró emergencia de malezas por la falta de humedad en la capa superficial del suelo.

La siembra se llevó a cabo el día 22-10-2009 con un sembradora CRUCIANELLI *Gringa IV* de 14 surcos a 0,525 m. de distancia entre los mismos.

El día 24-10-2009, con un pulverizador de arrastre PRABA de 16 m. de ancho de labor, se pulverizó con insecticida y herbicidas de preemergencia con las siguientes dosis:

Atrazina: $1,5 \text{ Kg ha}^{-1}$.

Glifosato: $2,5 \text{ Litros ha}^{-1}$.

2,4-D: $0,500 \text{ Litros ha}^{-1}$.

Dicamba: $0,500 \text{ Litros ha}^{-1}$.

Coadyuvante: $0,100 \text{ Litros ha}^{-1}$.

La fertilización se efectuó en el estado de V_6 , el día 18-12-2009, con fertilizante líquido y con una dosis de $252,5 \text{ Litros ha}^{-1}$ (equivalente a $100 \text{ Kg de N ha}^{-1}$), que fue determinada por el método de balance. El fertilizante, de marca comercial Sol Mix, tiene una densidad de $1,32 \text{ gr cm}^{-3}$ y de grado técnico 30-0-0.

Análisis estadístico:

Los datos se sometieron a análisis de ANOVA DOBLE y REGRESIÓN LINEAL por medio del software estadístico INFOSTAT.

Resultados y discusión

Teniendo en cuenta el objetivo de este trabajo y los factores que afectan a los cultivos en la región semiárida pampeana, se destacó el rol importante que cumple el agua útil total (AUT), que mostró una importante variación durante el ciclo del cultivo (Figura 1). Primeramente se resalta la diferencia que existe a favor del Bajo con respecto a la Loma en los valores de AUT, generada por la condición topográfica, la capacidad de retención de agua del perfil y el efecto del ascenso capilar de la capa freática.

La tendencia del AUT fue la misma en ambos ambientes, ya que se observó un aumento desde las primeras etapas de crecimiento del cultivo hacia R₂, dado por las precipitaciones ocurridas.

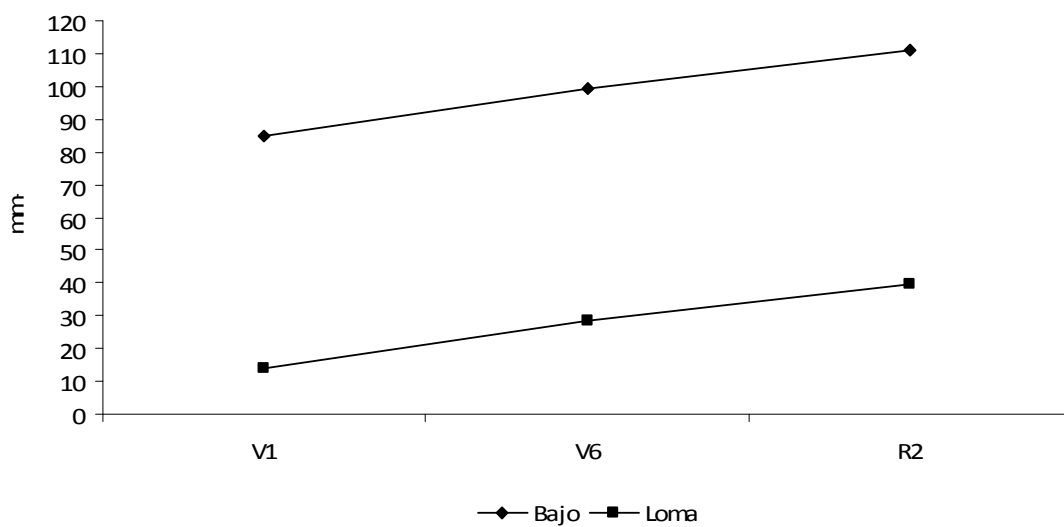


Figura 1: Evolución del AUT (promedio hasta los 120 cm de profundidad) en los distintos ambientes durante el ciclo del cultivo.

La concentración de nitratos (N) en el suelo mostró una disminución en el tiempo. El ambiente Loma tuvo mayores contenidos de N, que se mantuvieron hasta V6, decayendo en los últimos períodos. En cambio, en el ambiente Bajo, la concentración inicial fue menor, y se observó una caída lineal durante el ciclo del cultivo, pero siempre por debajo de los valores que se registraron en el ambiente Loma (Figura 2).

Lo explicado marca el consumo de este nutriente por parte del cultivo, que alcanza su máximo en floración.

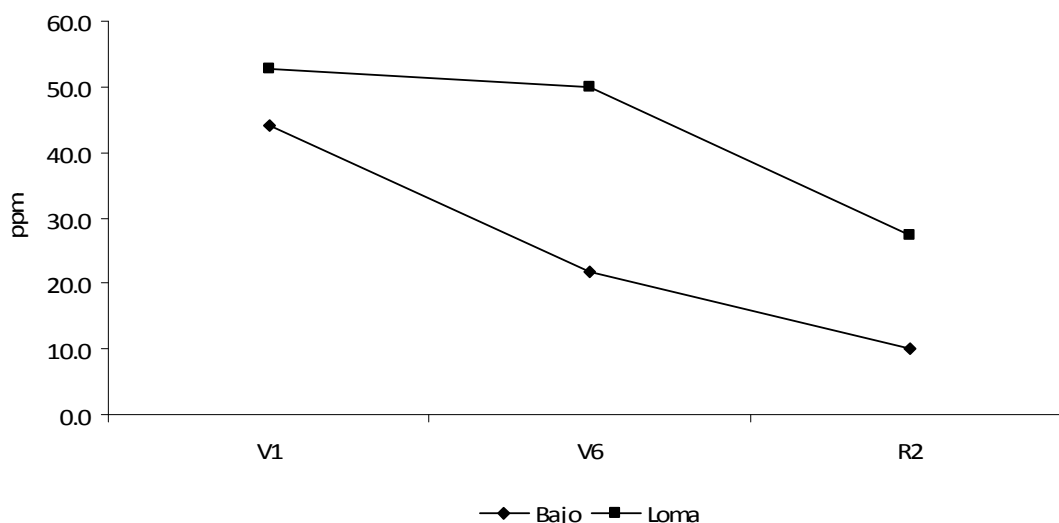


Figura 2: Evolución del contenido de N (NO_3^-) en el suelo (promedio hasta los 120 cm de profundidad) durante el ciclo del cultivo.

A continuación se presentará más detalladamente las variables estudiadas para cada uno de los estados evaluados.

Los valores de AUT entre los ambientes en el estado V_1 fueron significativamente diferentes, pero no se encontró diferencias significativas en los valores de N (Tabla 1). Se registraron valores de 89 mm para el Bajo y 14 mm para la Loma en lo que respecta al AUT. Por otra parte, los dos ambientes tuvieron niveles de entre 44 y 53 ppm NO_3^- .

Tabla 1: Diferencias de medias de AUT y NO_3^- hasta los 120 cm de profundidad entre ambientes en estado V_1 del cultivo (LSD Fisher, $p < 0,05$).

Ambiente	mm AUT	ppm NO_3^-	n
Bajo	89,19 a	44,06 a	16
Loma	14,25 b	52,94 a	16
DMS	14,27	16,39	
CV	39,76	46,66	

Letras diferentes verticalmente indican diferencias estadísticamente significativas.

Dentro de cada ambiente no se encontraron diferencias significativas en cuanto a NO_3^- en las densidades estudiadas. En cambio, para el caso del AUT se encontraron diferencias significativas entre densidades en la Loma y no en el Bajo (Tabla 2). Los valores para el Bajo fueron alrededor de los 85 mm de AUT y 44 ppm de NO_3^- , y en la Loma, la Baja densidad marcó 11 mm de AUT y la Alta densidad 17 mm AUT, los NO_3^- promediaron los 53 ppm sin mostrar diferencias estadísticamente significativas en ambas densidades.

Tabla 2: Diferencias de medias de AUT y NO₃⁻ hasta los 120 cm de profundidad en el bajo en estado V₁ del cultivo (LSD Fisher, p<0,05).

Ambiente	Densidad plantas	mm AUT	ppm NO₃⁻	n
Bajo	Baja	87,38 a	47,25 a	8
	Alta	83,00 a	40,88 a	8
DMS		30,33	25,63	
CV		33,20	54,24	
Loma	Baja	11,50 b	58,38 a	8
	Alta	17,00 a	47,50 a	8
DMS		5,19	23,50	
CV		33,97	41,41	

Letras iguales verticalmente no indican diferencias estadísticamente significativas.

Si bien no se encontraron diferencias significativas en los contenidos de NO₃⁻ entre las dos densidades, tanto en el Bajo como en la Loma estos fueron levemente superiores en el tratamiento de baja densidad, indicando menor consumo por parte del cultivo. En cambio, no se pudo observar una tendencia similar para los contenidos de AUT.

En el estado V₆ se encontró una situación diferente con respecto al estado V₁. La Tabla 3 refleja las diferencias significativas, tanto en AUT y NO₃⁻, entre ambos ambientes. El suelo del Bajo contenía más de 100 mm de AUT más que el de la Loma, y los valores de NO₃⁻ en promedio fueron de 22 ppm y 50 ppm, respectivamente.

Tabla 3: Diferencias de medias de AUT y NO₃⁻ hasta los 120 cm de profundidad entre ambientes en estado V₆ del cultivo (LSD Fisher, p<0,05).

Ambiente	mm AUT	ppm NO₃⁻	n
Bajo	99,38 a	21,75 b	16
Loma	28,50 b	50,00 a	16
DMS	6,71	11,31	
CV	14,54	43,68	

Letras diferentes verticalmente indican diferencias estadísticamente significativas.

Cuando se evaluaron los datos discriminados por ambientes, se obtuvieron valores que promediaron los 100 mm de AUT y los 24 ppm NO₃⁻ para el Bajo sin diferenciar entre densidades (Tabla 4). La Loma tampoco marcó diferencias entre las densidades de plantas, registrándose entre 23 mm y 33 mm de AUT, y 42 ppm y 57 ppm de NO₃⁻, en promedio.

Tabla 4: Diferencias de medias de AUT y NO₃⁻ hasta los 120 cm de profundidad en el bajo en estado V₆ del cultivo (LSD Fisher, p<0,05).

Ambiente	Densidad plantas	mm AUT	ppm NO₃⁻	n
Bajo	Baja	97,75 a	19,63 a	8
	Alta	101,00 a	28,88 a	8
DMS		8,97	11,58	
CV		8,43	49,65	
Loma	Baja	23,50 b	42,63 a	8
	Alta	33,50 a	57,38 a	8
DMS		9,80	19,83	
CV		32,08	36,99	

Letras iguales verticalmente no indican diferencias estadísticamente significativas.

En el estadio V₆ se produjo un aumento en el AUT con respecto V₁ en ambos ambientes, manteniendo las diferencias entre los mismos. Los contenidos de N disminuyeron tanto en la Loma como en el Bajo, siendo más marcados en este último. En el Bajo ambas densidades de plantas mostraron muy similares contenidos de AUT y NO₃⁻, pero en la Loma se observaron mayores valores de ambas variables en la densidad alta con respecto a la densidad baja. Aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas, podrían, sin embargo, reflejar mayores consumos de agua y NO₃⁻ por el cultivo a alta densidad de plantas.

En el estadio de R₂ del cultivo se agregó la fertilización como un factor más, a parte de los otros dos factores que fueron analizados en los estados anteriores del cultivo, ambiente (Bajo y Loma) y densidad de plantas (Baja y Alta). En este estadio también se determinó el índice de verdor (IV) con Minolta SPAD 502.

En el Bajo, cuando el cultivo se encontraba en R₂, se encontraron valores de AUT de 111 mm y 10 ppm de N, con diferencias significativas con respecto de los valores de la Loma. En ésta última se observaron valores de alrededor de 40 mm y 27 ppm de AUT y NO₃⁻ respectivamente (Tabla 5).

Tabla 5: Diferencias de medias de AUT y NO₃⁻ hasta los 120 cm de profundidad entre ambientes en estado R₂ del cultivo (LSD Fisher, p<0,05).

Ambiente	mm AUT	ppm NO₃⁻	n
Bajo	110,75 a	10,13 b	16
Loma	33,88 b	27,19 a	16
DMS	11,60	13,26	
CV	21,34	98,47	

Letras diferentes verticalmente indican diferencias estadísticamente significativas.

El análisis dentro de cada ambiente, evaluando las diferencias entre densidades y fertilización, determinó que el Bajo no registró diferencias estadísticamente significativas en AUT, aunque los mayores promedios se observaron en los tratamientos no fertilizados, mostrando valores en densidades bajas de 112 mm y en altas de 119 mm. Para NO₃⁻ se obtuvieron valores de 11 ppm para densidad baja fertilizada y 6 ppm en densidad baja no fertilizada (Tabla 6). Por otro lado, la densidad alta fertilizada marcó 17 ppm en promedio contra 6 ppm de la densidad alta no fertilizada. De esta manera, el efecto positivo de la fertilización nitrogenada sobre los contenidos de N del suelo se observó claramente.

En el ambiente Loma no se hallaron diferencias significativas tanto para AUT (entre 36 mm y 43 mm) y NO₃⁻ entre los tratamientos. Sin embargo, para el caso de los contenidos de NO₃⁻, los valores de los tratamientos fertilizados se separaron considerablemente de los no fertilizados (44 ppm y 33 ppm contra 12 ppm y 18 ppm para densidad Baja y Alta, respectivamente), pero el alto coeficiente de variación (CV) de los datos (88 %) impidió que esta diferencia fuera estadísticamente significativas.

Tabla 6: Diferencias de medias de AUT y NO₃⁻ hasta los 120 cm de profundidad en estado R₂ del cultivo (LSD Fisher, p<0,05).

Ambiente	Densidad de plantas	Fertilización	mm AUT	ppm NO₃⁻	n
Bajo	Baja	NO	112,75 a	6,00 b	4
		SI	107,25 a	11,00 ab	4
	Alta	NO	118,75 a	6,50 b	4
		SI	104,25 a	17,00 a	4
DMS			17,11	8,16	
CV			10,03	52,34	
Loma	Baja	NO	36,75 a	12,25 a	4
		SI	43,75 a	44,50 a	4
	Alta	NO	39,50 a	18,25 a	4
		SI	39,50 a	33,75 a	4
DMS			33,51	36,92	
CV			54,55	88,14	

Letras distintas verticalmente indican diferencias estadísticamente significativas.

El ambiente Bajo mostró valores de AUT que casi triplicaron los de la Loma (110 mm y 40 mm, respectivamente), sin encontrarse diferencias entre las densidades de plantas ni entre los tratamientos con y sin fertilización (Figura 3). Los contenidos de N no mostraron un comportamiento que se pueda relacionar con los factores del ensayo a excepción de que en ambos ambientes se hallaron los mayores valores en el tratamiento de baja densidad fertilizado, y los menores contenidos de este elemento en los tratamientos de baja densidad no fertilizados.

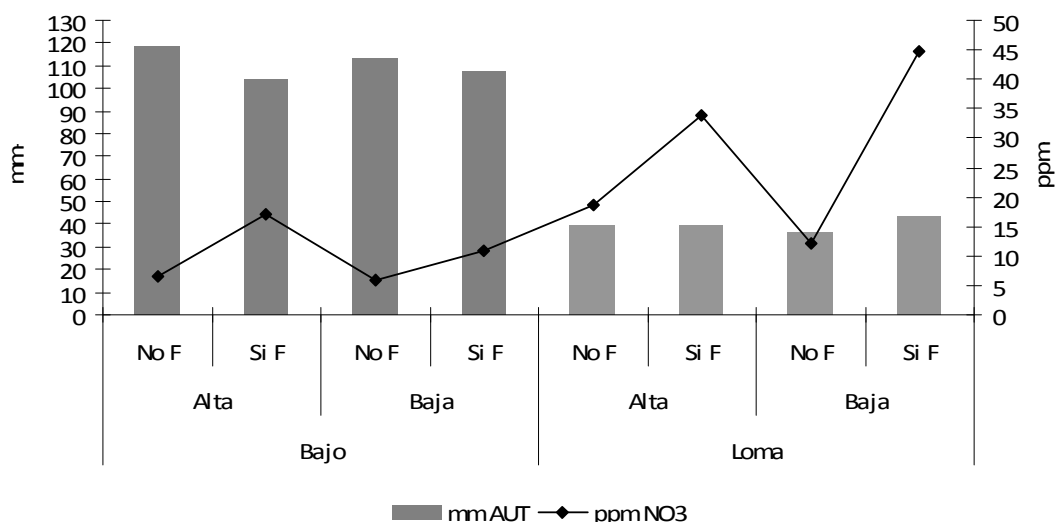


Figura 3: AUT y NO_3^- hasta los 120 cm de profundidad discriminados por densidad de plantas con y sin fertilización, en cada ambiente (bajo y loma) en estado R_2 .

Con el fin de evaluar un posible efecto de la contribución de la capa freática se analizaron los contenidos hídricos en cada estrato de suelo (a profundidades de 20 cm, 50 cm y 120 cm). Como se puede observar en la Figura 4 (estado V_1), el Bajo tuvo mayor contenido de agua, el cual es máximo en los 120 cm y mínimos en los 20 y 50 cm de profundidad, ambos con similares valores. En la Loma, en cambio, el AU mostró un frente discontinuo de humedad, notándose que en la profundidad de 50 cm el perfil se encontraba seco.

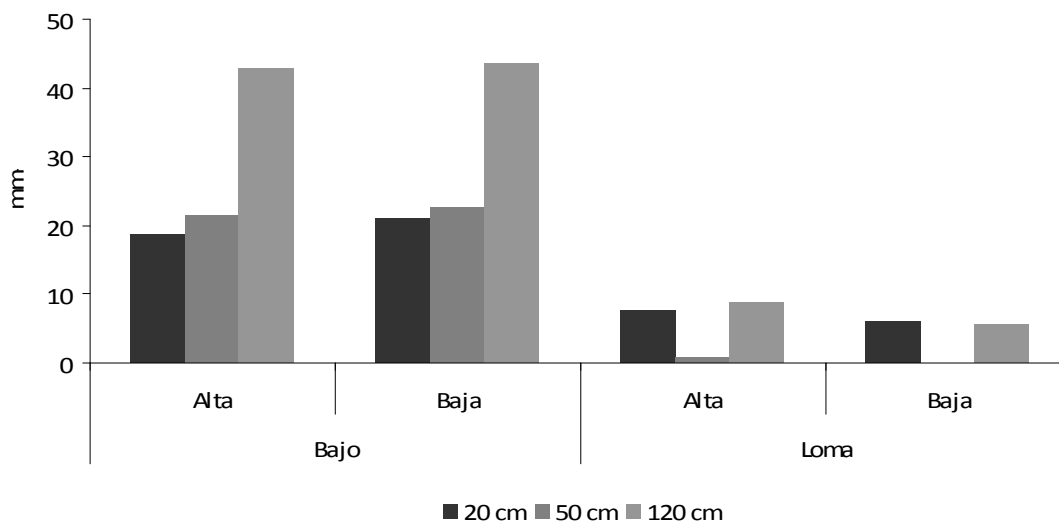


Figura 4: Distribución en el perfil del AU en las distintas densidades de plantas para cada ambiente, en estado de V_1 del cultivo.

En V_6 , por la recarga que sufrió el perfil, el contenido hídrico mejoró a la profundidad de 50 cm del Bajo y en los 20 y 50 cm de profundidad de la Loma. Entre las densidades de plantas no se encontraron diferencias en cuanto al AU. (Figura 5)

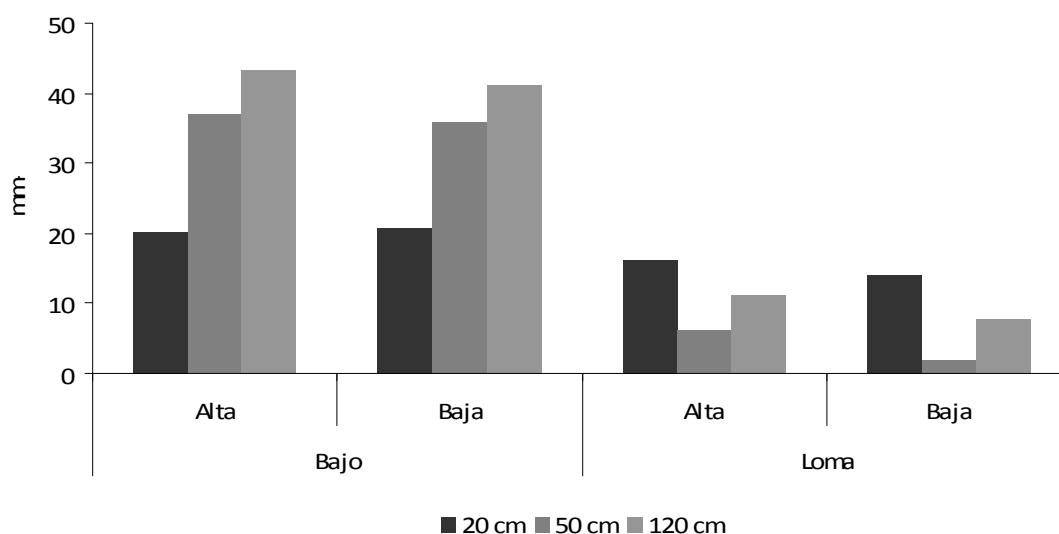


Figura 5: Distribución en el perfil del AU en las distintas densidades de plantas para cada ambiente, en estado de V_6 del cultivo.

En el momento que el cultivo se encontraba en R_2 los primeros 20 cm del suelo se mostraron con buenas condiciones de humedad en todos los tratamientos en los dos ambientes (Figura 6). En el Bajo no se observaron diferencias entre los primeros 20 cm y a los 50 cm de profundidad, mientras que en la Loma el contenido hídrico fue mayor en los 20 cm superiores. El Bajo mostró un efecto de ascenso freático, ya que la humedad a 120 cm de profundidad fue

muy superior al de las capas más superficiales. Tal como se observó en estadíos anteriores del cultivo, no se detectaron efectos de los diferentes tratamientos sobre el contenido hídrico del suelo.

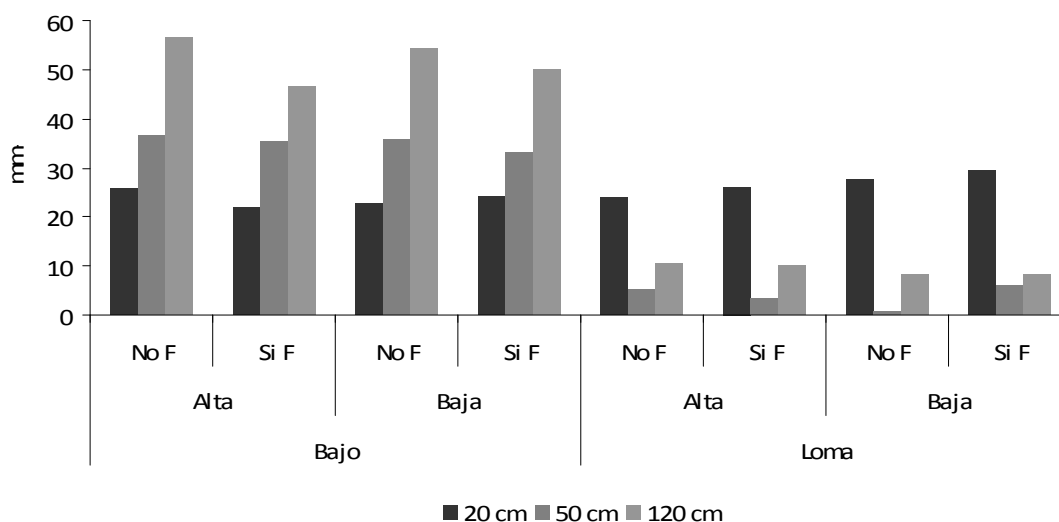


Figura 6: Distribución en el perfil del AU en las distintas densidades de plantas con y sin fertilización, para cada ambiente, en estado de R₂ del cultivo.

En las etapas iniciales del cultivo, los nitratos se concentraban en la capa superficial del suelo, siendo sus contenidos muy bajos a profundidad, tanto en el Bajo como en la Loma. En ésta última se registraron los mayores valores en promedio (Figura 7).

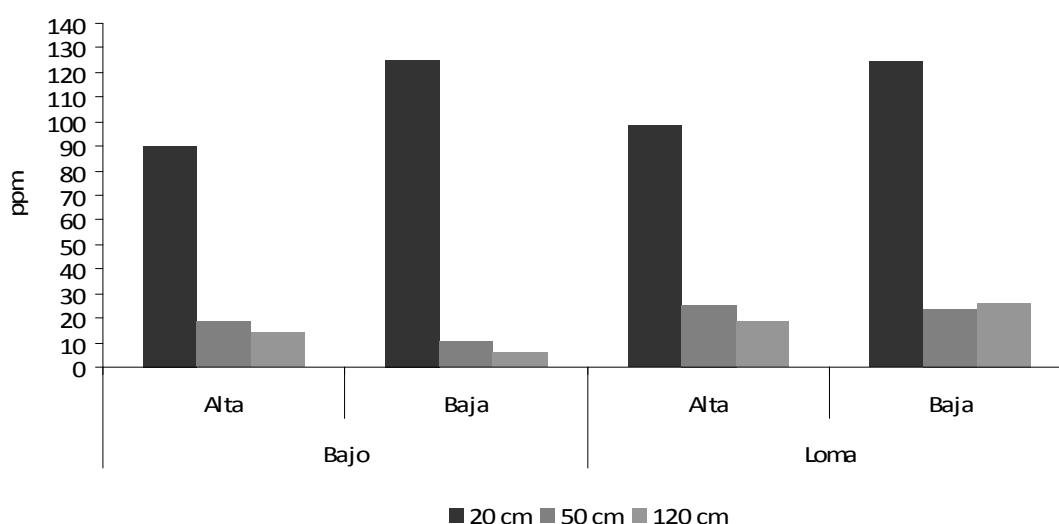


Figura 7: Distribución en el perfil de los NO₃⁻ en las distintas densidades de plantas para cada ambiente, en estado de V₁ del cultivo.

En el estado de V₆ se observó que los contenidos de NO₃⁻ en los primeros 20 cm del suelo disminuyeron en el Bajo y aumentaron en la Loma, con respecto a la fecha de muestreo

anterior. (Figura 8) Este comportamiento podría estar relacionado con el contenido hídrico de los perfiles de Bajo y Loma respectivamente (Figura 5). En la Loma se observaron bajos y similares contenidos de humedad en los tres estratos de suelo, y en correspondencia, se hallaron altas concentraciones de NO_3^- en la capa superficial y bajas en los estratos inferiores, lo cual indicaría que no hubo lixiviación de NO_3^- en este caso. En cambio, en el Bajo, se observaron altos contenidos hídricos, aumentando hacia mayores profundidades, y bajos nivel de NO_3^- en la capa superficial, comparado con Loma. Estos fueron similares a los contenidos de NO_3^- en la capa más profunda. Este comportamiento indicaría que en este ambiente hubo pérdidas de NO_3^- por lixiviación a la capa freática.

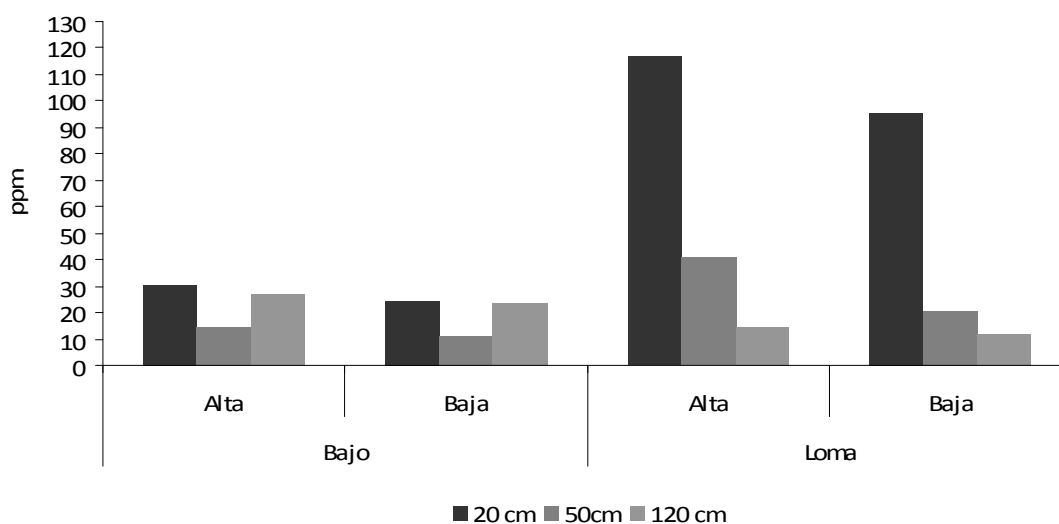


Figura 8: Distribución en el perfil de los NO_3^- en las distintas densidades de plantas para cada ambiente, en estado de V_6 del cultivo.

En el estado de R_2 en los distintos ambientes se observó nuevamente una importante disminución de los contenidos de NO_3^- con respecto a la fecha anterior (Figura 9). La Loma mantuvo los valores más altos y sobre todo en los tratamientos fertilizados. En el Bajo los contenidos de NO_3^- fueron muy bajos, muy parecidos entre tratamientos y entre las tres profundidades. El hecho de que los tratamientos fertilizados no se diferencien de los testigos confirmaría lo afirmado anteriormente con respecto a la importancia del proceso de lixiviación en este ambiente.

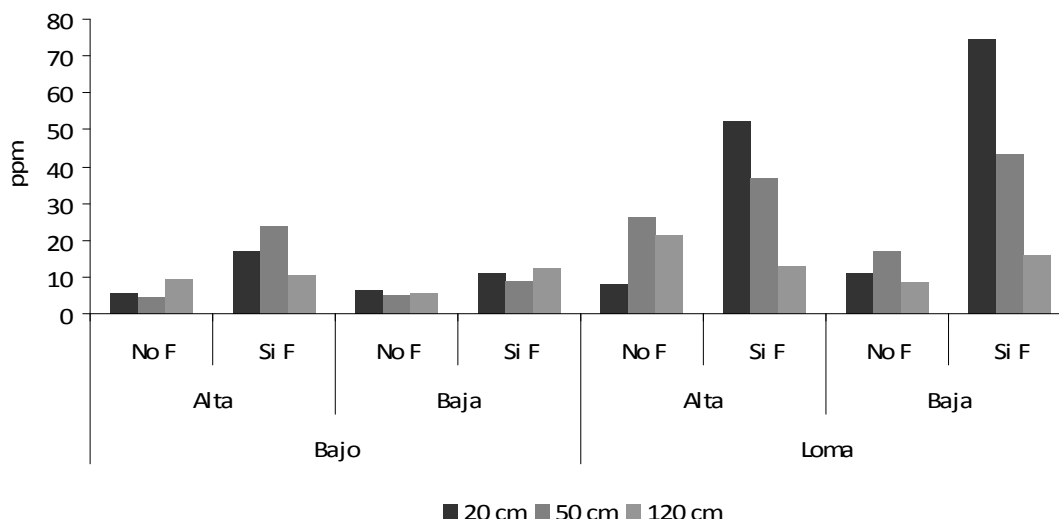


Figura 9: Distribución en el perfil de los NO_3^- en las distintas densidades de plantas con y sin fertilización, para cada ambiente, en estado de R_2 del cultivo.

El índice de verdor (IV) se determinó en R_2 , con valores medios de 34 en el Bajo y 45 en la Loma (Tabla 7). En este sentido el IV reflejó la misma tendencia que los contenidos de N en que ambas variables fueron significativamente mayores en la Loma. Es notable que el coeficiente de variación del IV fue considerablemente menor que el de NO_3^- , lo cual indicaría que esta variable fuera más sensible que el contenido de nitratos para diferenciar diferentes situaciones.

Tabla 7: Diferencias de medias de IV y NO_3^- hasta los 120 cm de profundidad entre ambientes en estado R_2 del cultivo (LSD Fisher, $p < 0,05$).

Ambiente	IV	ppm NO_3^-	n
Bajo	34,21 b	10,00 b	16
Loma	45,06 a	27,29 a	16
DMS	2,52	12,71	
CV	8,72	93,45	

Letras diferentes verticalmente indican diferencias estadísticamente significativas.

Cuando se analizaron los valores de IV y NO_3^- por ambiente se constató que en el Bajo los tratamientos fertilizados mostraron valores significativamente mayores de IV que los testigos, y que la densidad de plantas no tuvo efecto sobre esta variable. El mismo patrón se encontró para los contenidos de NO_3^- . Nuevamente se constató que los datos de IV arrojaron un menor coeficiente de variación que los contenidos de NO_3^- . (Tabla 8),

Tabla 8: Diferencias de medias de SPAD y NO_3^- hasta los 120 cm de profundidad en estado R_2 del cultivo (LSD Fisher, $p < 0,05$).

Ambiente	Densidad de plantas	Fertilización	IV	ppm NO_3^-	n
Bajo	Baja	NO	26,45 b	5,78 b	4
		SI	42,10 a	10,83 ab	4
	Alta	NO	26,70 b	6,37 b	4
		SI	41,60 a	17,01 a	4
DMS			6,53	8,06	
CV			12,39	52,35	
Loma	Baja	NO	45,38 a	12,09 a	4
		SI	45,45 a	44,58 a	4
	Alta	NO	43,55 a	18,55 a	4
		SI	45,88 a	33,94 a	4
DMS			3,75	37,09	
CV			5,41	88,23	

Letras distintas verticalmente indican diferencias estadísticamente significativas.

En la Loma, en cambio, no se encontraron diferencias significativas del valor de IV, para los factores densidad y fertilización, al igual que para los contenidos de N.

El análisis de regresión lineal entre el valor de IV y NO_3^- resultó no significativo, aún cuando los datos de Loma y de Bajo se analizaron en forma separada. Los coeficientes de regresión hallados fueron de 0.20 ($p = 0.08$) y 0.003 ($p = 0.95$) para el Bajo y la Loma respectivamente. Seguramente, en parte, esto se explicaría por el alto coeficiente de variación de los datos de N hallados en este ensayo. Estos resultados indicarían que el IV medido en el estadio R_2 tendría poco valor para la estimación de la disponibilidad de N para maíz.

En la Loma, los mayores valores de IV correspondieron a los tratamientos fertilizados, y éstos a su vez mostraron los mayores rendimientos (7900 y 8500 kg ha^{-1} para densidad baja y alta respectivamente), mientras que en el Bajo no se observó ninguna relación entre el valor de IV y el rendimiento del cultivo (Figura 10). Sin embargo, tampoco se pudo establecer una relación entre valores de IV y rendimiento en el ambiente Loma, dado que prácticamente no se observaron diferencias en el valor de IV entre tratamientos.

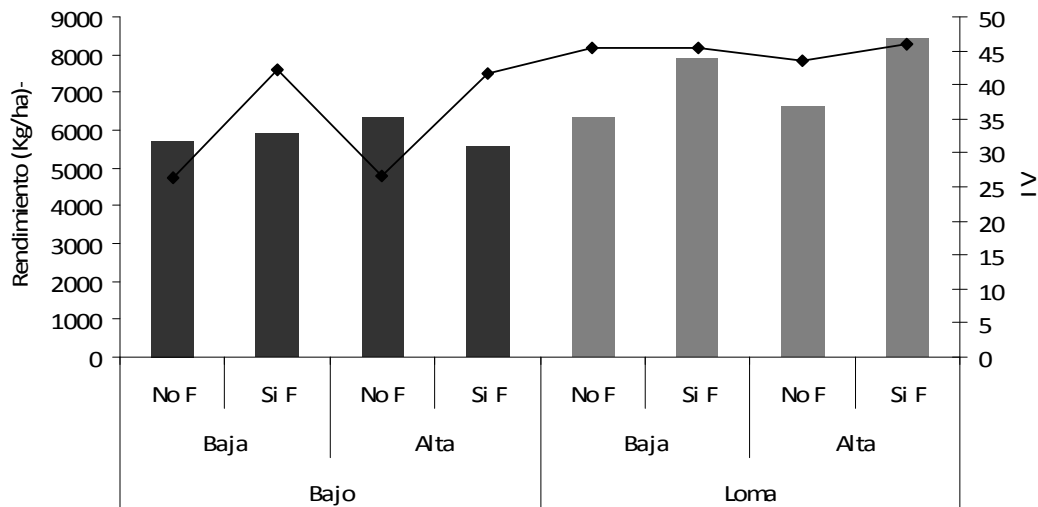


Figura 10: Rendimiento de grano y valor de IV en los tratamientos de baja y alta densidad de siembra, fertilizados y no fertilizados en los ambientes de Loma y Bajo.

Barraco y Diaz Zorita (2005) encontraron que en cultivos de maíz de la zona de Villegas, Prov. Buenos Aires, el IV medido en V_6 se diferenció entre el testigo y tratamientos fertilizados con N, pero no fue capaz de detectar diferencias entre dosis de este elemento. Estos autores encontraron una relación positiva ($R^2 = 0.56$) entre IV medido en la hoja de la espiga (R_3) y la disponibilidad de N (NO_2^- hasta los 60 cm de profundidad del suelo más la dosis de N aplicada como fertilizante) estimada en estado vegetativo. Sin embargo, tampoco hallaron una relación significativa de los valores de IV con la respuesta a la fertilización de maíz, y consideraron que no había mostrado su utilidad como variable predictiva de la disponibilidad de N para este cultivo. Sainz Rozas y Echeverría (1998) encontraron que el IV fue menos efectivo en predecir la disponibilidad de N para el cultivo de maíz que el contenido de nitratos en estados vegetativos para los suelos de la región de Mar y Sierras. Pfeffer *et al.* (2010) observaron similar ineficiencia para la predicción de la respuesta de maíz a la aplicación de N con otra tecnología espectral de estimación de contenidos de N en hoja. En su ensayo se utilizó el NDVI medido sobre el terreno a través del equipo "green-seeker" como variable para estimar deficiencia de N en un cultivo de maíz. Sus datos mostraron, tal como hemos encontrado en nuestro ensayo, que evidentemente otros factores del suelo y del cultivo afectan su color y por ende el valor de NDVI. Este efecto de la calidad del suelo sobre el valor de NDVI fue demostrado por Oliver *et al.* (2010), quienes utilizaron esta técnica para diferenciar espacialmente suelos con diferentes limitaciones en su perfil, como por ejemplo, diferencias

en la capacidad de retención de agua, profundidad del perfil, salinidad en profundidad y diferencias de pH.

Conclusiones

Los resultados del presente estudio mostraron que los ambientes estudiados se diferenciaron tanto en los contenidos de AUT como de N-NO_3^- en los distintos momentos de muestreo, manifestándose en ambos la tendencia decreciente en el tiempo. La Loma mostró los mayores valores de N-NO_3^- , siendo superiores en el estrato de los primeros 20 cm de suelo, indicando menor lixiviación. En el Bajo se encontró el mayor contenido de AUT, explicado principalmente por su textura, y el efecto de la napa freática se evidenció por la saturación del suelo a los 120 cm de profundidad.

Las densidades de plantas no tuvieron efecto sobre el AUT y N-NO_3^- en el análisis estadístico en ninguno de los dos ambientes, pero se observó que los contenidos de N-NO_3^- fueron superiores en el tratamiento de baja densidad.

Por otra parte, la fertilización tuvo distintas consecuencias en los dos ambientes. En el Bajo se observó que ésta incrementó los niveles de N-NO_3^- , sin afectar los contenidos de AUT. En cambio, en la Loma no se encontró tal efecto en el contenido de N-NO_3^- , ni en los valores de AUT.

Con respecto al IV, los ambientes se diferenciaron significativamente. En la Loma, los valores fueron mayores y no se diferenciaron los tratamientos fertilizados (F) y no fertilizados (NF) ni entre las densidades de plantas. En el Bajo, los tratamientos F mostraron valores superiores a los de NF, no habiendo diferencias para las diferentes densidades de plantas. Observamos que los mayores valores de IV se encontraron cuando se obtuvieron los mayores niveles de N-NO_3^- en el suelo. No se encontró una ecuación lineal que explicara una relación entre ambas variables, lo que indicaría que otros factores del suelo y del cultivo, que no se tuvieron en cuenta en este trabajo tuvieron un efecto sobre el IV.

Bibliografía

- Arkley R. 1963. "Relationships between plant growth and transpiration". *Hilgardia* 34:559-584.
- Barraco M. y Díaz Zorita M., 2005. "Momentos de fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en Hapludoles típicos". *Revista Ciencia del Suelo*. 23 (2 197-203).
- Bono A., Romano N. 2007. EEA INTA Anguil. Publicación técnica N° 71: 60-63 pp y 72-83 pp. ISSN 0325-2132.
- Echeverría, H y H Sainz Rozas. 2000. Nitrógeno, las opciones. *Fertilizar*. Número especial siembra directa. Año 5: 4-15.
- Ferrari M., J. Ostojic, L. Ventimiglia, H. Carta, G. Ferraris, S. Rillo, M. Galetto y F. Rimatori. 2000. Fertilización de maíz: Buscando una mayor eficiencia en el manejo de nitrógeno y fósforo. Actas Jornadas de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2000". Rosario, 28 de Abril de 2000. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires.
- García, F. 1999. "Fertilización de Maíz en la Región Pampeana". *Revista Agromercado*, Cuadernillo Maíz – Julio.
- García, F. 2008. "XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo". IPNI Cono Sur, www.ipni.net/lasc.
- Oliver, Y. M., Robertson M J., Wong M T F. 2010. Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modeling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. *European Journal of Agronomy*. 32, 40–50.
- Pfeiffer A., G. Stewart, K. Janovicek, W. Deen. 2010. Evaluation of canopy reflectance technology using a delta yield approach. *Agronomy Journal* 102: 1453-1461.
- Quiroga, A., D. Funaro, E. Noellemeyer, D. Peinemann. 2006. Soil quality indicators and barley fertilization response. *Soil & Tillage Res.*: 90: 63-68.
- Sainz Rozas H., Echeverría H.E., 1998. "Uso del medidor de clorofila para el monitoreo de la nutrición nitrogenada del cultivo de maíz". *Rev. Fac. Agron. La Plata*. 103:37-44.
- Soon, Y. and S. Abboud. 1991. Comparison of some methods for soil organic carbon determinations. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 22: 943-954.
- Spaw Model with Soil Water Characteristics Excel (6.02.75), USDA. [Http: hrsl.arsusda.gov/spaw/spawdownload.html](http://hrsl.arsusda.gov/spaw/spawdownload.html).
- Thomas A., Boxler M., Alvarez de Toledo B., Houssay R., Martín L., Berardo A. y García F., 2001. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Resultados de la campaña 2000/01: Maíz.
- Whelan, B.M., McBratney, A.B. 2000. The "Null Hypothesis" of precision agriculture management. *Precision Agriculture* 2, 265-279.