



RENDIMIENTOS DE MAÍZ REGADÍO: I. PARÁMETROS ASOCIADOS EN UN SUELO ALUVIAL DE MENDOZA (ARGENTINA) *

Soil indexes related to irrigated corn yields in a typic torrifuvent of Mendoza (Argentina)

León Nijensohn
José A. Maffei
Emilio Rearte **

ABSTRACT

In this work we took advantage of the great variability among replicates of the same fertilizer treatments in order to find relationships between soil characteristics and grain and stubble yield of each plot. In this loamy alluvial soil of ca. 60 cm deep over the stony subsoil (pebbles, gravel, etc). The grain yield in the 12 non fertilized plots ranged between ca. 5 t/ha and 15 t/ha, and the stubble between 7.75 t/ha and 26,65 t/ha. The general CV was 45%. The irrigation regime was optimized keeping the minimum available water at 30% of the total. Among the many soil characteristics studied total soil nitrogen (Nt) was the one that correlated most with the yield; P extracted with CO₂ saturated water at a 1:10 relation (P-CO₂ 1:10) and exchangeable potassium with ammonium acetate (Ke-NH₄) also showed some degree of correlation but the two of them showed significant correlations to Nt. Regression equations were calculated. Two groups of plots were separated among the

total 96 in the assay, and the minimum and maximum values of the related soil indexes were given. The group #I was characterized by a minimum grain yield of ca. 14 t/ha and group #II by a maximum yield of 5 t/ha. The minimum values for group I and the maximum for group II, as mg/kg in the 0-60 cm soil layer were, respectively : Nt 725 and 319 ; P-CO₂ 1:10 3.68 and 2.43; Ke-NH₄ 180 and 147. In the 12 non fertilized plots the regression equation found between grain yield in kg/ha (Y) and total Nt mg/kg in the 0-60 cm soil layer was: $Y = -3\ 393 + 24.04 X$, r^2 0.945 and the Standard error of estimation \pm 916.

Key words

irrigated corn • soil characteristics •
experimental error • fertility indexes

* El presente trabajo continuará en el próximo número de esta revista.

** Departamento de Ingeniería Agrícola. Facultad de Ciencias Agrarias. UNCuyo.
Almirante Brown 500. (5505) Chacras de Coria. Mendoza. Argentina
e-mail: caifca@uncu.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos fundamentales de la investigación edafológica en general, y de la regadía en especial, es la determinación de índices cuantitativos para los factores relacionados con las características del suelo y de manejo agrícola que permitan caracterizar las condiciones actuales y pronosticar las posibilidades de respuesta a tratamientos tendientes a optimizar la productividad en un determinado complejo agroecológico. El enfoque clásico de los estudios relacionados con dicho objetivo es realizar experiencias u observaciones comparativas donde se trata de establecer para un sitio determinado, o para áreas que se consideran similares, valores y criterios de significatividad estadística. Esta última está negativamente influida por el error experimental, el que depende de la variabilidad de los resultados obtenidos en las repeticiones de un mismo tratamiento o de la aplicación de los mismos índices edáficos a situaciones que aunque aparentemente son similares difieren por causa de factores no considerados específicamente. Dicho error experimental obscurece, en muchos casos, la interpretación de resultados que, considerados globalmente, revelan tendencias que resultan imposibles de justificar probabilísticamente.

La introducción de otras variables en la comparación de sitios: como ser la historia agropecuaria en todas sus facetas y las características meteorológicas de la(s) temporada(s) respectiva(s), se han evidenciado como herramientas útiles que permitieron establecer criterios de apreciable confiabilidad para las zonas húmedas y semihúmedas. En nuestro país se han realizado contribuciones valiosas con esa metodología, cuya mención pormenorizada escapa a los límites de este trabajo, pero que pueden consultarse, entre otras publicaciones, en las Actas de los Congresos Nacionales y en la revista *Ciencia del Suelo*, ambas editadas por la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Otro planteo posible es considerar a la variabilidad de las repeticiones de un mismo tratamiento en un ensayo, dentro de un cierto complejo agroecológico, no meramente como el determinante del frustrante elevado error experimental, sino como una vena de potenciales conocimientos a adquirir. Es decir, hipotetizar que a través del intento de identificación y cuantificación de los factores edáficos causales de la variabilidad parcelaria observada, se podrían calibrar índices de valor diagnóstico relacionados con los componentes de la productividad en el sistema suelo-agua-aire.

Un enfoque de ese tipo nos llevó a evidenciar en un ensayo de fertilización de tomate irrigado, donde se presumía que la disponibilidad hídrica no era un factor diferencial, que singularidades microtopográficas y/o de propiedades hidrodinámicas entre parcelas de un mismo tratamiento determinaban desigualdades en la lámina de agua retenida por la capa enraizable después del riego, la que se suponía debía equivaler a la de Capacidad de Campo. Esto nos permitió, por una parte, justificar la evidente respuesta a la fertilización fosfatada y, por otra, establecer el concepto de **Capacidad Real de Campo** y su relación directa con la productividad de la parcela (Nijensohn et al., 1965). Los objetivos de este trabajo son aprovechar la variabilidad interparcelaria en un ensayo de respuesta a la fertilización de maíz con riego optimizado, y en una superficie limitada, para establecer relaciones de rendimientos

de grano y de materia seca de rastrojos con índices edáficos (parte I) y de composición foliar (parte II) que resultaran significativamente asociados a ellos, de forma tal de calibrar, para ese cultivo y esas condiciones agroecológicas, valores de aplicación predictiva.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Suelo

Torrifluente típico, franco, sobre cantos rodados, mixta, ligeramente calcárea, térmico. Constituido por materiales aluviales de la terraza alta del Río Mendoza y de la parte superior del abanico fluvial determinado por la confluencia de conos de deyección provenientes de la precordillera. En todas las subfracciones de la arena predominan los feldes-patos (más de 55%) y dentro de ellos la ortosa que, en distintos estados de alteración, supera a las plagioclasas; sólo en segundo término se encuentra el cuarzo con poco más del 20 % (Fernández y Nijensohn, 1960). En la arcilla se identificaron montmorillonita, illita y caolinita en cantidades equivalentes, seguidas por una menor proporción de cloritas (Fernández y Nijensohn, 1969) . La profundidad de tierra fina oscila entre 0,60 m y 1 m; por debajo de esos niveles hay una creciente proporción de materiales gruesos: gravas y cantos rodados.

2. Sitio

Campo Experimental del Instituto de Suelos y Riego, Chacras de Coria, Luján de Cuyo, Mendoza (Argentina). Coordenadas geográficas: latitud S. 33° 00' 48", y longitud O. 68° 53'. 400 m al O. de la intersección de la abcisa 4348 y ordenada 2512 del reticulado de Gaus-Krüger (Instituto Geográfico Militar, Hoja 3369-22, 1946); cota 930 msnm. Promedios meteorológicos de importancia para el maíz: precipitación octubre-febrero: 147 mm. Temperatura media del aire noviembre-febrero: 20.55 °C y heliofanía: 94.75 %.

3. Antecedentes

El sitio corresponde a un ensayo de maíz realizado en busca de techos potenciales de rendimiento y de respuesta a la fertilización para las condiciones agroecológicas locales (Rearte et al., 1986). De acuerdo con ese objetivo, la mencionada experiencia se llevó a cabo bajo condiciones tendientes a optimizar el manejo del régimen hídrico a través de riegos de láminas controladas aplicadas a parcelas sin desagüe, adoptándose un umbral mínimo del 30 % del agua disponible en la capa diagnóstica de 0 a 0.60 m (Chambouleyron y Nijensohn, 1968). Se utilizaron dos variedades de maíz, Dentado Pioneer (D) y Colorado Contimax RF67 (C) y 8 combinaciones de fertilización, con cuatro niveles de nitrógeno: N 0, N 1, N 2 y N 3 correspondientes, respectivamente, a 0, 100, 200 y 400 kg/ha de N, aplicados como sulfato de amonio en tres parcialidades, y dos niveles de fósforo: P0 y P1, correspondientes a 0 y 80 kg/ha de P, incorporados como superfosfato de calcio antes de la siembra. Este planteo resultó en un total de 16 tratamientos, distribuidos en seis bloques al azar. En cada una de las 96 parcelas se determinaron la producción de granos con humedad al 14 % y el peso de materia seca a estufa del rastrojo, y se

extrajeron, pero no se analizaron, muestras de hojas de posición y fase de desarrollo predeterminadas, así como del material vegetal residual luego de la cosecha. Aunque los valores obtenidos mostraron en los rendimientos de grano una clara significatividad estadística de la acción favorable del nitrógeno en ambas variedades, y de la interacción N_1P_1 en el Colorado Duro, la variabilidad entre repeticiones fue muy marcada, lo que determinó un error experimental total elevado, CV de ca. 31 %. Por ejemplo, en el tratamiento testigo, NoPo, el coeficiente de variación para el conjunto de las dos variedades ensayadas (que no difirieron significativamente entre ellas) fue del 45 %, con un valor medio de rendimiento de 9 002 kg/ha y un rango parcelario entre 4 441 y 15 650 kg/ha (tabla 1).

Tabla 1. Promedios asociados de rendimientos de maíz y de índices de fertilidad edáfica. Parcelas sin fertilizar.

Variables	Colorado Duro		Dertado		Colorado + Dentado	
	M \pm CV	Rango	M \pm CV	Rango	M \pm CV	Rango
Rendimiento en grano kg ha ⁻¹	8720 \pm 46%	4876-14063	9285 \pm 47%	4441 - 15650	9002 \pm 45%	4441 - 15650
	mg kg ⁻¹					
Nt, 0-30 cm	542 \pm 38%	308-794	450 \pm 31%	350-756	496 \pm 35%	308-794
30-60 cm	592 \pm 31%	280-651	479 \pm 32%	336-660	535 \pm 31%	280-660
0-60 cm	567 \pm 33%	294-722	464 \pm 30%	343-708	516 \pm 32%	294-722
P ⁺ H ₂ CO ₃ 1:10	mg kg ⁻¹					
0-30 cm	2,64 \pm 23%	1,52-3,18	2,40 \pm 32%	1,72-3,50	2,52 \pm 27%	1,52-3,50
30-60 cm	1,81 \pm 38%	0,67-2,84	1,72 \pm 33%	0,93-2,37	1,77 \pm 34%	0,67-2,84
0-60 cm	2,23 \pm 14%	1,68-2,62	1,06 \pm 29%	1,36-2,80	2,15 \pm 21%	1,36-2,80
Ki (NH ₄)	mg kg ⁻¹					
0-30 cm	200 \pm 18%	148-242	182 \pm 10%	160-211	192 \pm 15%	148-242
30-60 cm	114 \pm 10%	101-129	117 \pm 9%	101-125	116 \pm 9%	101-129
0-60 cm	158 \pm 14%	125-182	150 \pm 5%	139-158	154 \pm 11%	125-182
Zn	mg kg ⁻¹					
0-30 cm	0,78 \pm 18%	0,51 - 0,99	0,68 \pm 25%	0,49 - 0,94	0,73 \pm 23%	0,49 - 0,99
30-60 cm	0,66 \pm 29%	0,44 - 0,95	0,57 \pm 33%	0,39 - 0,84	0,61 \pm 33%	0,41 - 0,95
0-60 cm	0,72 \pm 22%	0,48 - 0,97	0,62 \pm 26%	0,44 - 0,84	0,67 \pm 25,4%	0,44 - 0,97

4. Métodos

De acuerdo con el objetivo señalado en la Introducción, después de cosechado el maíz se muestreó el centro de cada parcela, de 14 m², separándose dos capas de tierra fina: de 0 a 0,30 y de 0,30 a 0,60 m. Las determinaciones efectuadas fueron: volumen de sedimentación (VS), (Nijensohn y Pilasi, 1969); índice pH en pasta saturada (pHs); capacidad de saturación (Ws), conductividad eléctrica del

extracto de pasta saturada (CEs) y potasio en dicho extracto (Ks) (Richards 1954); fósforo soluble en extracción con agua carbonicada ($P-CO_2$ 1:10) (Nijensohn, 1991); potasio en el mismo extracto ($K-CO_2$ 1:10) (González, 1982) y el intercambiable con acetato de amonio normal ($Ki-NH_4$); nitrógeno total (Nt) (Kjeldhal); hierro, zinc y manganeso extraíbles con el método de Lindsay y Norvell (1969) (Fe, Zn, Mn-DTPA) y, después de un riego general, la capacidad real de campo (Wrc) según Nijensohn et al. (1965). Los valores de esas características edáficas fueron relacionados con los rendimientos parcelarios (SAS, REG.1983). A pesar de los antecedentes de su positiva aplicación en la pampa húmeda y semihúmeda, no se consideró entre los índices promisorios de aplicación diagnóstica al N soluble ($NO_3 + NH_4$) porque en las modalidades de la agricultura regadía, que implican el "llenado del perfil" en presiembra, el agua percolada lixivia de manera no uniforme las formas iónicas del N acumuladas durante la temporada de invierno y principios de primavera, lo que resulta en una distribución puntual azarosa y en un rango de valores inferior al que podría atribuírsele importancia en la nutrición del cultivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Variabilidad de rendimientos e índices edáficos

En la tabla 2 (pág. 106) se consignan los valores medios, su variabilidad y el rango de las características edáficas determinadas en todo el ensayo. Como puede observarse -y eso es típico de los suelos regadíes regionales- en la pequeña superficie que abarcó el ensayo de alrededor de 1500 m² se manifiesta una notable dispersión de dichos valores, algunos de los cuales pudieron ser correlacionados significativamente con los niveles de rendimiento. En orden decreciente de variabilidad, y referidos al espesor total de la capa enraizable (0-0.60 m), se ordenan los índices edáficos determinados en la siguiente serie:

$CEs > Ks > Zn-DTPA > Ps \approx P-CO_2 \approx K-CO_2 \approx Nt > Mn-DTPA \approx Fe-DTPA > Ws \approx Wrc \approx VS.$

A pesar de su alta variabilidad la CEs no fue considerada, en este caso, como una variable inversamente relacionada con el rendimiento, dado que dicha variabilidad se observa alrededor de valores medios bajos. Aun en parcelas dentro del grupo de más alta productividad se presentan valores cercanos al extremo máximo de su rango. Tampoco se muestran como índices diferenciales de rendimiento, por su falta de significatividad aun a $P = 0.2$, los micronutrientes Fe y Mn, así como los extremos inferiores de la serie, cuya baja variabilidad denota, por una parte, la homogeneidad textural de la superficie en estudio (Ws y VS) y, por otra, la uniformidad con que se aplicó el riego (Wrc). Por lo tanto, subsisten como variables de interés diferencial las referidas a los factores nutricionales N, P, K y Zn.

En concordancia con el objetivo de establecer relaciones predictivas entre los índices empleados para caracterizar niveles de fertilidad de los cuatro nutrientes mencionados y los rendimientos obtenidos, se aprovechó el amplio rango de valores que presentaron las repeticiones de los tratamientos sin fertilizar. En la tabla 2 se detallan los datos parcelarios respectivos para ambas variedades, los que refle-

Tabla 2. Variabilidad de los índices edáficos del ensayo.

Índice	Profundidad cm	Media	S.D.	C.V. %	Mínimo	Máximo
Ces, dS m ⁻¹	0 - 30	1.87	1.42	75.8	0.64	5.83
	30 - 60	2.02	1.16	57.3	0.73	5.71
	0 - 60	1.95	1.22	62.7	0.77	5.77
V.S., mL kg ⁻¹	0 - 30	0.94	0.043	4.56	0.88	1.02
	30 - 60	0.952	0.054	5.67	0.86	1.04
	0 - 60	0.947	0.045	4.75	0.88	1.01
Ws, g kg ⁻¹	0 - 30	351.6	34.9	9.92	300	430
	30 - 60	355.9	40.1	11.27	288	448
	0 - 60	353.8	34.7	9.81	294	428
Wrc, g kg ⁻¹	0 - 30	203.2	11.4	5.61	189.3	220.3
	30 - 60	193.2	13.1	6.78	178.3	217.1
	0 - 60	198.2	11.9	6.01	186.5	218.7
N total, mg kg ⁻¹	0 - 30	630.4	152.1	24.1	308	918
	30 - 60	487.1	121.4	24.9	280	780
	0 - 60	558.7	130.1	23.3	294	849
P-CO ₂ 1:10, mg kg ⁻¹	0 - 30	2.61	0.89	34.1	0.74	4.55
	30 - 60	1.78	0.51	28.65	0.67	2.84
	0 - 60	2.19	0.56	25.57	0.94	3.52
Ki-NH ₄ , mg kg ⁻¹	0 - 30	198	35.43	17.89	148	312
	30 - 60	123	20.15	16.39	94	179
	0 - 60	161	22.33	13.89	125	246
K-CO ₂ 1:10, mg kg ⁻¹	0 - 30	92.7	29.96	32.32	58.5	187
	30 - 60	48.4	13.73	28.37	23	74
	0 - 60	70.6	18.59	26.33	43	123
Ks, me L ⁻¹	0 - 30	0.65	0.33	50.76	0.23	1.8
	30 - 60	0.28	0.13	46.43	0.1	0.65
	0 - 60	0.47	0.21	44.68	0.23	1.21
Ps, mg L ⁻¹	0 - 30	0.14	0.04	28.57	0.059	0.211
	30 - 60	0.16	0.05	31.25	0.042	0.251
	0 - 60	0.15	0.04	26.67	0.058	0.231
Fe - DTPA, mg kg ⁻¹	0 - 30	5.5	0.7	12.73	7.08	4.25
	30 - 60	5.6	1.3	13.27	8.67	3.31
	0 - 60	5.6	0.8	14.29	7.19	4.11
Zn - DTPA, mg kg ⁻¹	0 - 30	0.7	0.2	28.57	0.45	0.99
	30 - 60	0.6	0.2	33.33	0.36	1.07
	0 - 60	0.6	0.2	33.33	0.44	0.97
Mn - DTPA, mg kg ⁻¹	0 - 30	6.7	0.9	13.43	5.21	8.5
	30 - 60	4.2	1.1	26.19	2.77	6.61
	0 - 60	5.5	0.9	16.36	4.1	7.33

jan extremos de rendimientos tan dispares como, redondeando, 5 y 15 t/ha. La amplitud estadística de la variabilidad en el tratamiento testigo, NoPo, puede apreciarse en la tabla 1 (pág. 104), donde se la pone de manifiesto para los valores medios de rendimiento y de los índices edáficos respectivos, en cada variedad y, también, para el conjunto de ambas variedades, ya que la diferencia de productividad entre ellas no resultó ser estadísticamente significativa en las parcelas no fertilizadas. El examen de los datos consignados pone en evidencia la alta y prácticamente igual variabilidad de rendimientos de los dos cultivares ensayados: C.V. de 46-47 %.

En lo que respecta a los índices edáficos, los mayores y parecidos coeficientes de variación se registran en Nt, Zn-DTPA y P-CO₂ 1:10 para las dos capas analizadas, mientras que el Ki-NH₄ fluctúa dentro de un rango considerablemente menor. Es interesante observar que para el conjunto de las parcelas testigo los CV % de P-CO₂ y de Zn-DTPA de la primera y segunda capa difieren; los de Nt, en cambio, son análogos en ambas capas. Una explicación probable sería que mientras los contenidos y formas de P y Zn están ligados a la naturaleza de los materiales sedimentarios, que en este sitio son espacial y litológicamente discontinuos, la proporción de Nt en cada capa está esencialmente determinada por la distribución de la materia orgánica, formada in situ a partir de la vegetación original.

Tabla 3. Regresiones lineales entre rendimientos de grano de maíz regadío e índices de fertilidad edáfica. Parcelas sin fertilizar.

Parámetro	Colorado duro n = 6	Dentado n = 6	Colorado + Dentado n = 12
$y = kq \text{ ha}^{-1} \quad ; \quad x = mq \text{ kg}^{-1}$			
N total			
0-30 cm (x_1)	$y = -1833 + 19,48 x_1$ $r^2 = 0,98$	$y = -3830 + 22,14 x_1$ $r^2 = 0,876$	$y = -2617 + 20,50 x_1$ $r^2 = 0,912$
30-60 cm (x_2)	$y = -3934 + 28,13 x_2$ $r^2 = 0,965$	$y = -3750 + 27,20 x_2$ $r^2 = 0,907$	$y = -3785 + 27,53 x_2$ $r^2 = 0,933$
0-60 cm (x_3)	$y = -2660 + 23,03 x_3$ $r^2 = 0,98$	$y = -4258 + 25,29 x_3$ $r^2 = 0,922$	$y = -3393 + 24,04 x_3$ $r^2 = 0,945$
Ey _{x₃} , kg/ha	± 614	± 1367	± 916
P-H ₂ CO ₃ 1:10			
0-60 cm (x_3)	$y = -13456 + 993,7 x_3$ $r^2 = 0,61$	$y = -4993 + 6917 x_3$ $r^2 = 0,88$	$y = -6436 + 7188 x_3$ $r^2 = 0,68$
Ey _{x₃} , kg/ha	0,1 > P > 0,05	± 1691	± 2377
K int. (NH ₄)			
0-60 cm (x_3)	$y = -17067 + 163,5 x_3$ $r^2 = 0,82$	$y = -24722 + 213,9 x_3$ $r^2 = 0,92$	$y = -20465 + 186 x_3$ $r^2 = 0,86$
Ey _{x₃} , kg/ha	± 1919	± 1405	± 1602
Zn - DTPA			
0-60 cm (x_3)	$y = -1941,8 + 14806 x_3$ $r^2 = 0,42$	$y = 2787 + 10419 x_3$ $r^2 = 0,18$	$y = 1563 + 11063 x_3$ $r^2 = 0,24$
	± 3433 (n.s.)	± 4435 (n.s.)	± 3688 (n.s.)

Nota: la significatividad de los r² es al 0,01

2. Correlaciones entre rendimientos de grano e índices edáficos

En la tabla 3 (pág. 107) se muestran las ecuaciones de regresión lineales establecidas entre los rendimientos y los niveles parcelarios de las características de fertilidad determinadas. El Nt de cada una de las dos capas, y en ambas variedades, se revela muy significativamente correlacionado con los rendimientos, pero los mayores valores del coeficiente r^2 para el conjunto de ellas se manifiestan cuando se toman los promedios del espesor total considerado como enraizable.

Los valores de r^2 para P-CO₂ son menores y únicamente el referido al cv. Dentado alcanza significatividad estadística. En cuanto al Ki-NH₄ los r^2 significativos están acompañados por altos valores de los errores estándar de estimación (Ey). El r^2 del Zn-DTPA no resulta significativo, aunque se acerca a P = 0,1.

En el conjunto de las dos variedades todos los índices de los tres macronutrientes mostraron ser estadísticamente significativos, pero con valores de r^2 en orden decreciente para N, P y K. Los coeficientes de determinación de las correlaciones múltiples no superaron al de la correlación lineal simple con Nt como única variable, según tabla siguiente:

Tabla 4. Porcentaje del rendimiento potencial de grano de maíz en parcelas sin fertilizar. (100 % = 15 650 kg/ha) vs índices edáficos.

Variables mg/kg	Y % =	r^2
Nt X ₁	-21.1292 + 0.1530 X ₁ Ec = 0.01175 Ey = 6.370328	0.9443
P-CO ₂ 1:10 X ₂	-41.1155 + 45.9806 X ₂ Ec = 9.89955 Ey = 15.1792	0.6803
Zn - DTPA X ₃	9.83623 + 71.05673 X ₃ Ec = 40.1660 Ey = 23.55685	0.2384
X ₁ + X ₂	-30.4541 + 0.1321 X ₁ + 7.6514 X ₂ + 8.4925 X ₃ EcX ₁ = 0.01794; EcX ₂ = 6.77916 Ey = 6.027607	0.9551
X ₁ + X ₂ + X ₃	-32.5478 + 0.1321 X ₁ + 7.6514 X ₂ + 8.4925 X ₃ EcX ₁ = 0.018515; EcX ₂ = 6.77916 EcX ₃ = 12.426143 Ey = 6.216935	0.95756

Ec: error estándar del coeficiente

Ey: error estándar de estimación

Tabla 5. Correlaciones edáficas significativas entre variables edáficas. Maíz regadío en Torrifuente típico, Chacras de Coria (Mendoza).

Variable principal	Capa (cm)	Variables correlacionadas (r)
Nt	0 - 30	Nt ¹ 30-60 (.9528**); PCO ₂ (.7029**); Ki (.6426**); Ws (.6653**)
P-CO ₂ 1:10	0 - 30	Zn - DTPA (.7135**); Ki (.7376**); VS (.6809**)
P-CO ₂ 1:10	30 - 60	Fe - DTPA (.7110**)
K-CO ₂ 1:10	0 - 30	Ki - NH ₄ (.6441**)
Ki-NH ₄	0 - 30	VS (.7999**)
Kes	0 - 30	Kes 30-60 (.7343**); VS (.6390**); Ws (.6538**)
Kes	0 - 60	Zn - DTPA (.6372*)
Fe - DTPA	0 - 30	Mn - DTPA (.6828*)
Mn - DTPA	0 - 30	Mn - DTPA 30-60 (.7067**)
Mn - DTPA	30 - 60	Zn - DTPA (.6722*); Wsw (.8811***); VS (.7406**)
Zn - DTPA	0 - 30	Zn - DTPA 30-60 (.7256**); VS (.7384**)
Zn - DTPA	30 - 60	Ws (.6487*); VS (.7051)

1 Sólo se consigna la capa de la variable correlacionada cuando difiere de la principal.

* P = 0,05 ** P = 0,01 *** P = 0,001

Las correlaciones logarítmicas simples y múltiples no se muestran dado que revelaron menores valores de coeficientes de regresión que las lineales.

Esto podría explicarse por las muy significativas correlaciones entre los valores de Nt y los otros dos principales parámetros de fertilidad: P-CO₂ y Ki-NH₄ (tabla 5). Por lo tanto, en esta situación específica, el Nt por sí solo, constituye el mejor índice del nivel de fertilidad. Esto mismo ocurre cuando la variable dependiente es el por-centaje relativo del rendimiento máximo observado en las parcelas no fertilizadas. En este caso la introducción de P y Zn en las regresiones múltiples (no se ingresó al Ki-NH₄ por su baja variabilidad en el ensayo, tabla 1) superan sólo ligeramente al r² con Nt como única variable independiente, siendo muy leve la diferencia en el error estándar de estimación (tabla 4, pág 108).

3. Niveles de rendimiento de grano y variables edáficas asociadas

Con el objeto de poner de manifiesto aquellos índices edáficos naturales de fertilidad cuya variabilidad caracterizan mejor la potencialidad productiva de un sitio en las condiciones agroecológicas generales del ensayo (riego optimizado y características edáficas consignadas en tabla 1), se agruparon en dos niveles extremos los rendimientos obtenidos con las dos variedades de maíz ensayadas en el tratamiento sin fertilizar, y los correspondientes valores promedio, cetera paribus, de cada uno de los factores nutrimentales determinados con la metodología mencionada.

En el grupo superior se consideraron aquellas parcelas que tuvieron como límite inferior un rendimiento de ca. 14 000 kg/ha; el grupo inferior, en cambio, lo integraron las parcelas cuyo rendimiento no sobrepasó un techo de 5 000 kg/ha. Los resultados de este agrupamiento se consignan en la siguiente tabla:

Tabla 6. Grupos extremos de rendimiento y valores umbrales y techos de los índices de fertilidad correspondientes.

Rendimientos en grano de maíz regadío en Torrifluente típico.

	Rendimiento en grano kg ha ⁻¹	
	Alto	Bajo
Índices medios de fertilidad	14 000 y más	5 000 y menos
	Umbrales	Techos
N total, 0-60 cm, mg kg ⁻¹	725	319
P-CO ₂ 1:10, id. , id.	3,68	2,43
Ki-NH ₄ , id. , id.	180	147

El umbral de Nt encontrado en este ensayo para rendimientos elevados difiere de los citados para otras zonas del país. En una red de ensayos en la provincia de Santa Fe, Bonel et al. (1973) encontraron una relación negativa significativa entre respuesta a la fertilización nitrogenada y el contenido de N total. Estos autores señalan como "límite crítico" para suelos con una historia de 8 a 10 años de agricultura un valor de Nt de 1 300 mg/kg. Debe señalarse que en esa experiencias intervino como variable importante el régimen pluviométrico. En Pergamino (provincia de Bs. As.) en un ensayo con riego complementario en un suelo medianamente provisto de P, con un contenido de Nt de 1413 mg/kg en la capa de 0-0.60 m, la fertilización nitrogenada significó un incremento del 52 % sobre el testigo cuyo rendimiento fue de 4 125 kg/ha (Lemcoff et al., 1983). Podría ser que la mayor eficiencia del Nt en nuestro caso esté relacionada con la calidad de la materia orgánica formada en las condiciones ecológicas del lugar. Es así que en un sitio con 675 mg/kg de Nt y

185 mg/kg, de $Ki-NH_4$ suelo de Chacras de Coria franco, dentro de la misma propiedad de la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA), Gaviola y Nijensohn (1987) encontraron en ensayos de incubación que la relación porcentual de N potencialmente mineralizable/Nitrógeno total era del 38.5 %, valor superior al encontrado por Oyanadel y Rodríguez (1977) para Inceptisoles y Entisoles chilenos (8.9 %-21 %). Si las exportaciones de N para una cosecha de grano de maíz de 14 500 kg/ha se estiman en ca. 350 kg/ha (Gervy, 1982), lo que equivale a ca. 50 mg/kg de N promedio en la capa 0-0.60 m, tenores de más de 725 mg/kg de N total de las características de mineralización señaladas por Gaviola y Nijensohn justifican los máximos rendimientos observados en las parcelas testigo con ese contenido umbral. Coincidentemente, Perez Valenzuela et al. (1992) encontraron en suelo de la FCA que los máximos rendimientos en grano de maíz, (12 500 kg/ha, 15 % de humedad) correspondieron a contenidos de Nt de 780 mg/kg. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el umbral de Nt para rendimientos elevados señalado en la tabla 6 (pág. 110) no sería válido en condiciones de deficiencia de P. En otro sitio, dentro siempre de la FCA, con un contenido en la capa 0-0.60 m de 420 mg/kg de Nt, Pizzi et al. (1985.b) sólo obtuvieron un rendimiento medio de 3 583 kg/ha. Uno de los factores evidentes fue la baja disponibilidad fosfórica, cuyo índice fue de 1.50 mg/ha $P-CO_2$ 1:10. Eso se puso de manifiesto en un ensayo posterior en el mismo lugar, con distintas dosis de N, donde el agregado de una exigua dosis de P (22 kg/ha) provocó un aumento del 23 % sobre los tratamientos sin nitrógeno.

Los valores de las otras variables investigadas que se detallan en la tabla 1 se superponen en ambos grupos, por lo que en esta situación no fueron consideradas como índices diferenciales de productividad, pero tienen validez para la caracterización del sitio. A ese respecto es dable consignar los contenidos de micronutrientes correspondientes a la parcela de máximo rendimiento, de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 7. Proporción de micronutrientes extraíbles correspondientes a la parcela de máximo rendimiento en todo el ensayo, 21 053 kg/ha

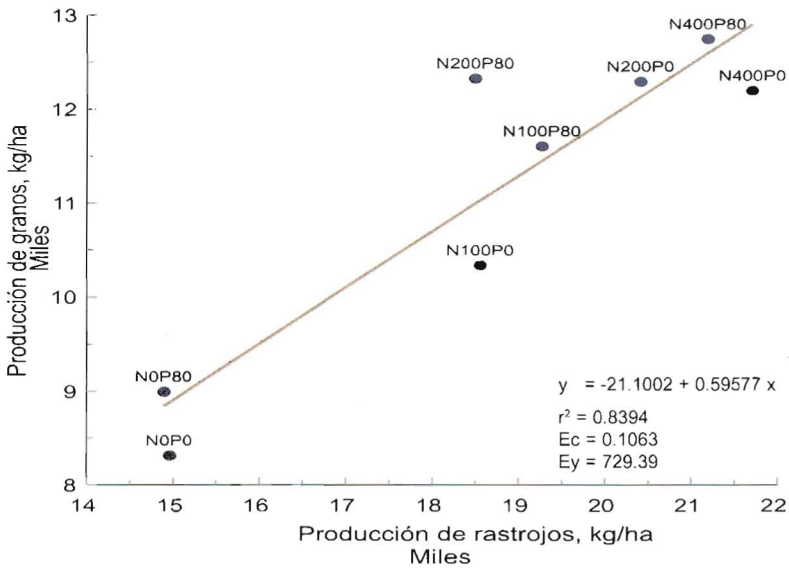
	Capa 0 – 30 cm	Capa 30 - 60 cm	Capa 0 - 60 cm
Fe - DTPA, mg/kg	7.08	5.90	6.49
Mn - DTPA, mg/kg	7.38	3.79	5.59
Zn - DTPA, mg/kg	0.94	0.78	0.86

De los valores consignados se desprende que mientras el Fe-DTPA y el Mn-DTPA superan los límites considerados como mínimos adecuados para cultivos sensibles, 4.5 y 1.0 mg/kg, respectivamente, el Zn-DTPA está en el extremo superior dentro del rango considerado como marginal, 0.5 - 1.0 mg/kg (Viets y Lindsay, 1973). Como datos comparativos consignamos que Ratto de Miguez y Fatta (1990) citan para la zona del Sur de Santa Fe y Norte de Buenos Aires, valores medios de 57, 105 y 230 mg/kg para Fe-DTPA, Mn-DTPA y Zn-DTPA, todos ellos muy superiores a los del suelo de este ensayo.

4. Índices edáficos y materia seca de rastrojos: relación entre materia seca de rastrojos y de granos

Promediando las 6 repeticiones de cada uno de los 8 tratamientos ensayados resulta una correlación lineal altamente significativa entre ambos parámetros, según ilustra la siguiente figura, donde también se consigna la correspondiente ecuación de regresión. De ella se desprende que por cada kg de grano con 14 % de humedad se produjeron ca. 1.7 kg de materia seca de rastrojos.

Relación de la media de tratamientos entre producciones de materia seca de rastrojos y de granos.



5. Relaciones entre rendimientos de materia seca de rastrojos e índices edáficos

En la tabla 8 (pág. 113) se consignan las correlaciones y las ecuaciones de regresión simples y múltiples entre los rendimientos de las 12 parcelas sin fertilizar y los índices edáficos de disponibilidad de nutrientes. Su examen comparado con la tabla 5 (pág. 109) revela ciertas diferencias en cuanto a la influencia de esos índices sobre la producción. En el caso de los rastrojos, y siempre dentro del nivel de $P = 0.01$, son algo menores los r^2 para Nt y P-CO₂ 1:10 y mayor el de Zn-DTPA. Pero lo más importante es que el Ki-NH₄ que no mostraba una correlación significativa con el rendimiento de granos, sí lo exhibe, y en un grado superior al P, con respecto a la producción de rastrojos. El mayor valor de r^2 y, simultáneamente el menor error estándar de estimación se logra con una ecuación múltiple con las cuatro variables consideradas.

Tabla 8. Rendimiento de rastrojos secos de maíz regadío en parcelas sin fertilizar vs. índices edáficos.

Variables mg/kg	Y, t/ha	r ²
Nt X ₁	-3.2201 + 0.0225183 X ₁ Ec = 0.002503 Ey = 1.357077	0.8900***
P-CO ₂ 1:10 X ₂	-5.6269 + 6.5192162 X ₂ Ec = 1.6908144 Ey = 2.59518	0.5979**
Ki-NH ₄ X ₃	-19.2173 + 0.1742553 X ₃ Ec = 0.0274835 Ey = 1.826495	0.8008***
Zn - DTPA X ₄	-0.77889 + 13.625763 X ₄ Ec = 5.4883934 Ey = 3.21887	0.3813*
X ₁ + X ₂	-3.94214 + 0.02092 X ₁ + 0.719465 X ₂ EcX ₁ = 0.004203 ; EcX ₂ = 1.484722 Ey = 1.41218	0.8929***
X ₁ + X ₂ + X ₃	-9.05602 + 0.0159 X ₁ + 0.401583 X ₂ + 0.052908 X ₃ EcX ₁ = 0.05915 ; EcX ₂ = 1,478254; EcX ₃ = 0,044858 Ey = 1.382462	0.9087***
X ₁ + X ₂ + X ₃ + X ₄	-7.15841 + 0.018835 X ₁ - 4247 X ₂ + 0.01893 X ₃ + 5.581479 X ₄ EcX ₁ = 0.0049020 ; EcX ₂ = 1.236029 ; EcX ₃ = 0.038789 ; EcX ₄ = 2.388124 Ey = 1.10764	0.9487***

Ec: error estándar del coeficiente
Ey: error estándar de estimación

* P = 0.005

** P = 0.01*** P = 0.001

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue aprovechar la elevada variabilidad entre las repeticiones de tratamientos dentro de un ensayo de respuesta a la fertilización de maíz con riego optimizado, para establecer relaciones de rendimientos de grano y materia seca de rastrojos con características edáficas que resultaran significativamente asociadas a ellos, de forma tal de calibrar, para ese cultivo y para similares condiciones agroedafoecológicas, índices de productividad de valor predictivo. Los rendimientos en grano (14 % humedad) registrados en ese Torrifluente típico franco, con subsuelo de cantos rodados, oscilaron en la superficie limitada del ensayo y en el tratamiento sin fertilizar entre ca. 5 000 y 15 000 kg/ha, con un CV del 45 % y los de materia seca de rastrojos entre ca. 7 750 y 26 650 kg/ha. El estudio de las características edáficas de cada parcela permitió identificar como principal factor relacionado con los rendimientos de grano y de materia seca de rastrojos al Nitrógeno total promedio de la capa 0-60 cm ($r^2 = 0.944$ y $r^2 = 0.8900$, respectivamente). Esto coincide con la respuesta significativa a la fertilización nitrogenada. El Fósforo extraíble con

agua carbonicada y el K intercambiable con NH_4 también mostraron estar asociados con el rendimiento, pero cada uno de estos índices, a su vez, estuvo significativamente correlacionado con el N total. Entre los micronutrientes sólo el Zn mostró una tendencia a la asociación con los rendimientos de grano, y significatividad estadística su correlación con los de materia seca de rastrojos.

En la consideración del conjunto de parcelas se establecieron dos grupos extremos para los cuales se determinaron umbrales y techos de los índices edáficos correlacionados con el rendimiento en granos. En el grupo de rendimientos mayores a ca. 14 000 kg/ha los mínimos medios para la capa de suelo 0-60 cm fueron: Nt 725 mg/kg ; P-CO_2 1:10 3,68 mg/kg y Ki-NH_4 180 mg/kg . En el grupo de rendimientos menores de ca. 5 000 kg/ha los valores máximos medios fueron para esas mismas variables edáficas 319, 2.43 y 147 mg/kg, respectivamente. La regresión calculada entre rendimiento de grano en kg/ha (Y) y el contenido de Nt en mg/kg de la capa de 0-60 cm (X) en las parcelas no fertilizadas fue: $Y = -3\,393 + 24.04 X$, r^2 0.945 y un error estándar de estimación de ± 916 . Se verificó una correlación altamente significativa entre rendimientos de grano y de materia seca de rastrojos, siendo la razón media entre ellos de 1.8 kg/rastrojos/kg grano. En cuanto a materia seca de rastrojos, además del Nt y del P-CO_2 1:10, adquiere mayor importancia el Zn-DTPA y en especial el Ki-NH_4 que supera, a diferencia del rendimiento en granos, al P. El mayor valor de r^2 y, simultáneamente, el menor error estándar de estimación se logra con una ecuación múltiple que incluye a N, P, K y Zn.

REFERENCIAS

- Bonel, J.A., Novello, P. y Legasa, A. 1973. Resultados de pruebas de fertilización nitrogenada de maíz en los departamentos Caseros y Constitución (Santa Fe) en la campaña agrícola 1972-73. INTA-EERA Marcos Juárez, Informe Técnico N° 44, Santa Fe.
- Chambouleyrón, J. y Nijensohn, L. 1968. Respuesta del maíz a diferentes regimenes de riego en suelo franco de Chacras de Coria, Luján, Mendoza. Actas del III Congreso Nacional del Agua, separata 294-310, San Juan.
- Fernández, G.A.L. y Nijensohn, L. 1960. Composición mineralógica de fracción arena de algunos suelos de Mendoza. Experimenta, FCA-UNCuyo, 12-XII: 1-26.
- _____. 1969. Composición de la fracción arcilla de sedimentos del Río Mendoza y de algunos suelos de la pcia. de Mendoza. In Actas de la Quinta Reunión Nacional de la Ciencia del Suelo: 678-691, Santa Fe.
- Gaviola, S. y Nijensohn, L. 1987. Nitrógeno potencialmente mineralizable de cinco tipos de suelos regadíos de Mendoza. Rev.Ciencia del Suelo Vol.5 N° 2, p.142-149.
- Gervy, R. 1982. Research on the role of fertilizers in the intensification of agriculture. Phosphorus in Agriculture, 36 th year, March 1982 (82): 11-21, ISMA Ltd, Paris.
- González, M. 1982. Potasio fácilmente disponible extraído por solución carbónica y tabla de interpretación. Estudio de suelos del sur mendocino. Proyecto San Rafael, Tomo I, p. 99-100. Convenio INTA-CFI.
- Lemcoff, J.H., Álvarez, R., Daniel, P.E. y Canova, D. 1983. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre maíz cultivado bajo riego. I: Producción de materia seca y contenido de nitrógeno de la planta. III Congreso Nacional del Maíz, Pergamino, Buenos Aires.
- Lindsay, W.L. and Norvell, W.A. 1969. Development of a DTPA micronutrient soil test. Agron. Abstr., p. 84.

- Nijensohn, L. 1991. Fósforo extraíble con agua carbónica en el diagnóstico del nivel de fertilidad fosfórica en suelos aluviales regadíos. Actas II Jornada Nacional sobre "Fósforo en el suelo". Primera parte. Asociac.Arg.de la Ciencia del Suelo. Comité de Química, Buenos Aires.
- Nijensohn, L. y Pilasi, H. 1969. El volumen de sedimentación como método indirecto para la determinación de la Capacidad Hídrica a 15 bares. In Actas de Quinta Reunión Nacional de la Ciencia del Suelo: 678:691, Santa Fe.
- Nijensohn, L., Avellaneda, M.O. y Olmos, F.S. 1970. Respuesta de la vid (*Vitis vinifera*) cvs. Criolla y Cereza a la fertilización en suelo Barrancas arenoso. Rev.de la Facultad de Ciencias Agrarias, XVI , (1-2): 3-18, Mendoza.
- Nijensohn, L., Olmos, F.S. y Pizarro, O.C. 1965. The concept of "Actual Field Capacity" and its applications to fertilizers experiments under irrigation. Transaction of the VII International Congress of Soil Science, Comm.I & VI, II: 463-469, Bucarest, Rumania.
- Oyanadel, C. y Rodríguez, J. 1977. Estimación de la mineralización de N en el suelo. Ciencia e Investigación Agraria, Chile 4: 33-44.
- Perez Valenzuela, B.R., Vallone, R.C. y Maffei, J.A. 1992. Rendimiento de maíz en suelos de Chacras de Coria. V Jornadas de Investigación y Docencia de la FCA-UNCuyo, Mendoza.
- Pizzi, D., Dupertuis de Ramazzi, L., Calvente, A., Cid, C.E. y Caretta, A. 1984. Ensayo de rendimiento entre nueve variedades e híbridos en cultivo irrigado de maíz. Publicación del Departamento de Seminarios N° 3, págs. 7, FCA-UNCuyo, Mendoza.
- Pizzi, D., Dupertuis de Ramazzi, L., Calvente, A., Caretta, A., Toso, A. y Valle, N. 1985. Ensayo de fertilización en maíz. Respuesta comparativa a distintas dosis de fertilizante en cultivo irrigado de maíz híbrido. Publicación del Departamento de Seminarios N° 6, págs.9, FCA-UNCuyo, Mendoza.
- Ratto de Míguez, S. y Fatta, N. 1990. Disponibilidad de micronutrientes en suelos del área maicera núcleo. Rev. Asoc. Arg. Ciencia del Suelo. Vol. 8. N° 1. p. 9-15.
- Rearte, E., Ciancaglini, N., Nijensohn, L. Y Maffei, J.A. 1986. Respuesta a la fertilización y riego controlado de maíces dentados y colorado duros. In Libro de resúmenes de trabajos expuestos en las X Jornadas de Investigación de la Universidad Nacional de Cuyo, Resumen N° 138, editado por CIUNC, Mendoza.
- Richards, L.A. (Edit.). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Salinity Laboratory Staff. USDA Handbook 60, 160 pp. Washington, D.C.
- Viets, F.G.Jr. And Lindsay, W.L. 1973. Testing soil Zn, Cooper, Manganese and Iron. In Leo M. Walsh and James D. Beaton (editors). Soil Testing and Plant Analysis. Revised Edition, p.165. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin.