




Critical indexes of compositional nutrient diagnosis (CND) and its validation in wheat fields

Índices críticos de diagnóstico de nutrientes composicionales (CND) y su validación en campos de trigo

Índices críticos de diagnóstico composicional de nutrientes (CND) e sua validação em campos de trigo

Abolfazl Geiklooi¹, Adel Reyhanitabar^{2*} and Nosratollah Najafi³

¹Former Ph.D student of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email address: abolfazl.geikloo@gmail.com, . Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail address: areyhani@tabrizu.ac.ir or areyhanitabar@yahoo.com, . ³Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email address: nanajafi@yahoo.com, .

Abstract

Plant nutrient composition can be used as an evaluation criterion for optimum plant growth. The objectives of present study were to (a) derive critical compositional nutrient (CND) norms for survived wheat fields and sufficiency ranges as CND nutrient index for validation samples, (b) provide a squared CND threshold nutrient imbalance index (CND r^2) and compare with DRIS nutrient imbalance indices, (c) determine balanced nutrients concentration with CND indices. The yield cutoff value was 4,232 kg.ha⁻¹. The CND indexes results indicate that Zn is the most deficient nutrient in wheat, followed by Cu, Fe, Mn and B, whereas N is the most excessive nutrient, followed by K, Ca, Mg and P. In the validation trials, the yield cutoff value were reported 5,023 kg.ha⁻¹. The calculated CND r^2 in the validation population was lower than that of the survey wheat fields, indicating a more balanced concentration of nutrients due to the application of fertilizer treatments. Significant principal component (PC) loadings were obtained after the varimax rotation. The first three PCs in high- and low-yielding subgroups and whole data set indicated 52.8, 54.6 and 48.8 % total variance, respectively.

Recibido el 23-08-2019 • Aceptado el 24-11-2020.

*Autor de correspondencia. Correo electrónico: areyhani@tabrizu.ac.ir

This study revealed that the decline in the wheat yield was due to the nutrient imbalance associated with multi nutrient deficiency (Zn, Cu, Fe, Mn and B) and multi nutrient excess (N, K, Ca, Mg and P).

Keywords: compositional nutrient diagnosis (CND), diagnosis and recommendation integrated system (DRIS), nutrients composition, principal component analysis (PCA).

Resumen

La composición de nutrientes de las plantas se puede usar como criterio de evaluación para crecimiento óptimo. Los objetivos del estudio fueron (a) derivar normas de nutrientes composicionales críticos (CND) para campos de trigo sobrevivientes y rangos de suficiencia como índice de nutrientes CND para muestras de validación, (b) proporcionar un índice de desequilibrio de nutrientes umbral CND ($CND r^2$) y comparar con índices de desequilibrio de nutrientes DRIS, (c) determinar la concentración equilibrada de nutrientes con índices de CND. El valor de corte de rendimiento fue 4.232 kg.ha⁻¹. Los resultados de los índices CND indicaron que el Zn es el nutriente más deficiente, seguido de Cu, Fe, Mn y B, mientras que N fue el nutriente más excesivo, seguido de K, Ca, Mg y P. En validación, el valor del rendimiento de corte fue 5.023 kg.ha⁻¹. El $CND r^2$ calculado en la población de validación fue menor que el de campos de trigo encuestados, lo que indicó una concentración más equilibrada de nutrientes debido a la aplicación de fertilizantes. Se obtuvieron cargas significativas del componente principal (CP) después de la rotación varimax. Los tres primeros CP en subgrupos de alto y bajo rendimiento y conjunto de datos completos indicaron 52,8; 54,6 y 48,8 % de varianza total, respectivamente. Este estudio reveló que la disminución en el rendimiento del trigo fue causada por el desequilibrio de nutrientes asociado con la deficiencia de multi nutrientes (Zn, Cu, Fe, Mn y B) y el exceso de múltiples nutrientes (N, K, Ca, Mg y P).

Palabras clave: diagnóstico de nutrientes composicionales (CND), sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS), composición de nutrientes, análisis de componentes principales (ACP).

Resumo

A composição de nutrientes da planta pode ser usada como um critério de avaliação para o crescimento ideal da planta. Os objetivos do presente estudo foram (a) derivar normas de nutrientes de composição crítica (CND) para campos de trigo sobreviventes e faixas de suficiência como índice de nutrientes CND para amostras de validação, (b) fornecer um índice de desequilíbrio nutricional de limiar de CND ao quadrado ($CND r^2$) e comparar com Os índices de desequilíbrio de nutrientes DRIS, (c) determinam a concentração de nutrientes equilibrada com os índices CND. O valor de corte de rendimento foi de 4.232 kg.ha⁻¹. Os resultados

dos índices CND indicam que Zn é o nutriente mais deficiente em trigo, seguido por Cu, Fe, Mn e B, enquanto N é o nutriente mais excessivo, seguido por K, Ca, Mg e P. Nos ensaios de validação, o rendimento o valor de corte foi de 5.023 kg.ha⁻¹. O CND r^2 calculado na população de validação foi inferior ao dos campos de trigo da pesquisa, indicando uma concentração mais equilibrada de nutrientes devido à aplicação de tratamentos de fertilizantes. Cargas significativas de componentes principais (PC) foram obtidas após a rotação varimax. Os três primeiros PCs em subgrupos de alto e baixo rendimento e conjunto de dados inteiro indicaram 52,8; 54,6 e 48,8% de variância total, respectivamente. Este estudo revelou que o declínio na produtividade do trigo foi devido ao desequilíbrio de nutrientes associado à deficiência de multi nutrientes (Zn, Cu, Fe, Mn e B) e ao excesso de multi nutrientes (N, K, Ca, Mg e P).

Palavras-chave: diagnóstico composicional de nutrientes (CND), sistema integrado de diagnóstico e recomendação (DRIS), composição de nutrientes, análise de componentes principais (PCA).

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most important food crops in the world. The total wheat cultivated area in Iran is about 6.5 million hectares. Balanced nutrition in crop is an important factor in improving the quality and quantity of crops. Nutrient composition of plant is diagnosed directly by leaf analysis (Hallmark and Beverly, 1991). Since nutrients uptake and distribution are affected by their interactions in the plants, multi-nutrient detection methods such as diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) (Beaufils, 1973.) and compositional nutrient diagnosis (CND) (Parent and Dafir, 1992) have been proposed to assess the nutrients status of plants. The CND method proffer solutions to the limitations of both CVA and DRIS and generated nutrient standards are comparable to those of the boundary-line approach (Ali, 2018).

Introducción

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es uno de los cultivos más importantes en el mundo. El área total de trigo cultivada en Irán es de aproximadamente 6,5 millones de hectáreas. La nutrición balanceada en el cultivo es un factor importante en el mejoramiento de la calidad y cantidad de los cultivos. La composición de nutrientes de las plantas es diagnosticada directamente por el análisis de la hoja (Hallmark y Beverly, 1991). Dado que la absorción y distribución de nutrientes se ven afectadas por sus interacciones en las plantas, los métodos de detección de múltiples nutrientes como el sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS) (Beaufils, 1973) y el diagnóstico de nutrientes composicionales (CND) (Parent y Dafir, 1992) han sido propuestos para evaluar el estado nutricional de las plantas. El método de CND propone soluciones a la limitaciones tanto de

Njoroge *et al.* (2017) developed CND norms of the high yielding subpopulations of corn for two seasons of short rains (SR) and long rains (LR). Gott *et al.* (2016) determined nutritional restriction order by DRIS and CND methods respectively as follow: $Zn > Fe > Mn = B > N > P > Cu > K > Ca > S > Mg$ and $P = Zn > Fe > B > N > Mn > K = Cu > S > Ca > Mg$. Dezordi *et al.* (2016) stated that the four diagnostic methods (Critical Level, Sufficiency Range, DRIS and CND) generated similar reference values of nutrients for the carrot crop (*Daucus carota* L.). The result of this study showed that Mn, Mg, K and Ca were respectively the most limiting nutrient for growing carrot. Yousef *et al.* (2013) reported that the effectiveness of yield-limiting nutrients application was $Mg < K < Ca < Fe < Zn < P < N < S < B$ using CND method. PCA is used on row-centered log ratios and derived nutrient indices in CND method for describing the interaction between the nutrients (Parent *et al.*, 1994; Raghuptahi *et al.*, 2005).

Unfortunately, in the study region, because of application mostly two types of fertilizers (urea and triple superphosphate) there are nutrient imbalances. The composition of crop nutrition, especially wheat, has not been investigated in this area so far and there is no published research on this subject. A study was conducted in Sahl El-Tina, Egypt, to determine the composition of nutrient balance and norms in wheat crop using CND method (Ali *et al.*, 2016).

The objectives of present study were to (1) derive CND norms for

CVA como DRIS y los estándares de nutrientes generados son comparables a los del enfoque de línea límite (Ali, 2018).

Njoroge *et al.* (2017) desarrollaron normas, CND para subpoblaciones de maíz de alto rendimiento, para dos temporadas de precipitaciones cortas (SR) y precipitaciones largas (LR). Gott *et al.* (2016) determinaron el orden de restricción nutricional mediante los métodos de DRIS y CND respectivamente de la siguiente manera: $Zn > Fe > Mn = B > N > P > Cu > K > Ca > S > Mg$ and $P = Zn > Fe > B > N > Mn > K = Cu > S > Ca > Mg$. Dezordi *et al.* (2016) determinaron que los cuatro métodos de diagnóstico (Nivel crítico, rango de suficiencia, DRIS Y CND) generaron valores de referencia similares de nutrientes para el cultivo de zanahoria (*Daucus carota* L.). El resultado de este estudio mostró que Mn, Mg, K y Ca fueron respectivamente los nutrientes limitantes para el crecimiento de la zanahoria. Yousef *et al.* (2013) establecieron que la efectividad de la aplicación de nutrientes que limitan el rendimiento fue $Mg < K < Ca < Fe < Zn < P < N < S < B$ a través del uso del método CND. PCA es utilizado en proporciones logarítmicas centradas en filas e índices de nutrientes derivados en el método CND para describir la interacción entre los nutrientes (Parent *et al.*, 1994; Raghuptahi *et al.*, 2005).

Desafortunadamente, en el área de estudio, existe desequilibrio de nutrientes debido a la aplicación de principalmente dos tipos de fertilizantes (urea y superfosfato

wheat fields of studied region and sufficiency ranges as CND nutrient index for validation samples, (2) provide a squared CND threshold nutrient imbalance index (CND r^2) and compare with DRIS nutrient imbalance indices, (3) determine balanced nutrients concentration with CND indices.

Materials and methods

Data collection. The fields under investigation belong to agro-industrial Moghan Company situated in Ardabil Province, Northwest of Iran (from 39°23' to 39°42' N and from 47°25' to 48°23' E). The soils in this region are mainly Aridisols and Entisols according to the US soil classification system (Soil Taxonomy) (Banaii, 2000).

Composite soil samples (top 30 cm) were collected from each of 96 wheat fields with Kalango and Soisson

triple). La composición de la nutrición de cultivos, específicamente del trigo, no ha sido investigada en esta área hasta ahora y no hay investigaciones publicadas sobre este tema. Un estudio se llevó a cabo en Sahl El-Tina, Egipto, para determinar la composición del balance de nutrientes y normas en el cultivo de trigo usando el método CND (Ali *et al.*, 2016).

Los objetivos del presente estudio fueron (1) derivar normas CND para campos de trigo de la región estudiada y rangos de suficiencia como índice de nutrientes CND para muestras de validación, (2) proporcionar un índice umbral de desequilibrio de nutrientes CND al cuadrado (CND r^2) y comparar con índices umbral de desequilibrio de nutrientes DRIS, (3) determinar la concentración equilibrada de nutrientes con Índices CND.

Materiales y métodos

Recolección de Datos. Los campos bajo investigación pertenecen

Table 1. Soil properties at the experimental field.

Cuadro 1. Propiedades del suelo en campo experimental.

	pH	EC	OC	CaCO _{3-eq}	Total N	Ca†	Mg†	Na†
		(dS/m)				(g.kg ⁻¹)		
Min.	7.7	1.67	0.6	30	0.3	8.9	0.093	0.43
Max.	8.2	7.71	23.2	210	1.8	28.8	4.2	1.6
Mean±SD	7.3 ± 0.17	1.17 ± 0.46	9.8 ± 3.8	103.3 ± 40	0.9 ± 0.3	11.7 ± 2.1	1.9 ± 0.7	0.7 ± 0.2
	K‡	P‡	Cu‡	Mn‡	Fe‡	Zn‡	B‡	
	(mg kg ⁻¹)							
Min.	391	4.4	0.42	0.96	0.19	0.04	0.02	
Max.	1726	40	6.96	8.87	10.86	1.62	2.63	
Mean±SD	760 ± 226	17 ± 5.2	2.4 ± 1	5.25 ± 1.45	4.81 ± 2.15	0.52 ± 0.24	1.19 ± 0.6	

EC: Electrical Conductivity, OC: Organic carbon, CaCO₃: Calcium carbonate, †: exchangeable ‡: available.

EC: Conductividad eléctrica, OC: carbono orgánico, CaCO₃: carbonato de calcio, †: intercambiable ‡: disponible.

cultivars at the beginning of the growing season. Samples were taken randomly to determine some chemical properties and soil essential nutrients status (Page *et al.*, 1982). The obtained results are shown in table 1.

The bread wheat cultivars of Soissons and Kalango were cropped at selected fields. Flag leaf samples were collected randomly from 96 wheat fields at the stage of flag leaf emergence (GS-39) (Singh *et al.* 2005). After air-drying, the samples were dried in the oven at 70° C and ground. N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Cu and B determined by appropriate laboratory methods (Bhargava and Raghupathi, 1993). The wheat grain yield for the selected fields was obtained from the agronomic bureau at the Moghan agro-industrial company.

Validation the threshold nutrient imbalance index

A field experiment was conducted at agro-industrial Moghan Company of Parsabad Moghan, Ardabil province, Iran, involving application of Zn, Fe, Mn, and Cu to bread wheat. Validation tests were performed in three separate areas due to the vastness of agro-industrial Moghan Company lands and altitude range from 32 to 150 meters above sea level. Three separate trials in randomized block design were laid out. The experiment was a $2 \times 2 \times 2 \times 2$ factorial at 2 levels of Zn ($Zn_0 - Zn_{0.3\%}$), Fe ($Fe_0 - Fe_{0.3\%}$), Mn ($Mn_0 - Mn_{0.1\%}$), Cu ($Cu_0 - Cu_{0.1\%}$) with 3 replicates per treatment. Nutrients were applied through foliar spray at two stages of tillering and stem extension. With counting to three separate trials and four factors at two levels each

a la compañía agroindustrial Moghan, situada en la provincia Ardabil, Noroeste de Irán (De 39°23' a 39°42' N y de 47°25' a 48°23' E). Los suelos en esta región son principalmente aridisoles y entisoles según el sistema de clasificación de suelos de EE. UU. (Taxonomía de suelos) (Banaii, 2000).

Muestras compuestas de suelos (Por encima de 30 cm) fueron recolectadas por cada 96 campos de trigo con cultivares Kalango y Soisson al comienzo de la temporada de crecimiento. Se tomaron muestras al azar para determinar algunas propiedades químicas y el estado de los nutrientes esenciales del suelo (Page *et al.*, 1982). Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 1.

Los cultivares de trigo Soissons y Kalango fueron cosechados en campos seleccionados. Las muestras de la hoja bandera fueron recolectadas aleatoriamente de 96 campos de trigo en la etapa de emergencia de la hoja bandera (GS-39) (Singh *et al.* 2005). Después del secado al aire, las muestras fueron secadas en el horno a 70°C. N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Cu y B se determinaron a través de métodos de laboratorios apropiados (Bhargava y Raghupathi, 1993). El rendimiento del grano de trigo para campos seleccionados se obtuvo en la oficina agronómica de la compañía Agroindustrial Morgan.

Validación del índice umbral de desequilibrio de nutrientes

El experimento de campo se llevó a cabo en la compañía agroindustrial Morgan de Parsabad Moghan, provincia de Ardabil, Irán, que involucró la aplicación de Zn, Fe,

in three replication giving 144 plots. Leaf samples were randomly collected from wheat plots at the stage of flag leaf emergence. The concentration of nutrients and yields were determined by the previous methods.

Analytical approach

Plant tissue composition forms a *d*-dimensional nutrient arrangement; i.e. simplex (S_d) made up of *d* + 1 nutrient proportions including *d* nutrients, and a filling value (R_d) defined as (Parent and Dafir, 1992):

$$S_d = [(N,P,K,\dots,R_d):N>0,P>0,\dots R_d>0,N+P+K+\dots+R_d=100] \quad (1)$$

Where 100 is the dry matter concentration (%); N, P, K . . . are nutrients proportions (%), and R_d is the filling value computed as:

$$R_d = 100-(N+P+K+\dots) \quad (2)$$

According to CND methodology proposed by Parent and Dafir (1992), row-centered log ratio calculated for raw nutrient concentration. Thereafter, the database is partitioned between two subgroups using the Cate-Nelson procedure, once the observations have been ranked in a decreasing yield order.

CND norms are computed using means and standard deviations corresponding to the row-centered log ratios V_x of *d* nutrients for high-yield specimens, The CND nutrient imbalance index of a diagnosed specimen is its CND r^2 and is computed by:

$$r^2 = I^2_N + I^2_P + I^2_K + I^2_{Ca} + I^2_{Mg} + I^2_{Fe} + I^2_{Zn} + I^2_{Mn} + I^2_{Cu} + I^2_B + I^2_{Rd} \quad (3)$$

Because CND indices are independent, unit-normal variables, the CND r^2 values must have a chi-square distribution function. CND

Mn, and Cu al pan de trigo. Los test de validación se desarrollaron en tres áreas separadas debido a la amplia extensión de las tierras de la Compañía agroindustrial Moghan, cuya altitud variaba de 32 a 150 metros sobre el nivel del mar. Se dispusieron tres ensayos separados en un diseño de bloques completamente al azar. El experimento fue un $2 \times 2 \times 2$ factorial a dos niveles de Zn ($Zn_0 - Zn_{0,3\%}$), Fe ($Fe_0 - Fe_{0,3\%}$), Mn ($Mn_0 - Mn_{0,1\%}$), Cu ($Cu_0 - Cu_{0,1\%}$) con 3 réplicas por tratamiento. Se aplicaron nutrientes a través de spray foliar en dos etapas de macollamiento y extensión del tallo. Contando tres ensayos separados y cuatro factores en dos niveles, cada uno en tres repeticiones se originaron 114 parcelas. Las muestras de hojas fueron recolectadas aleatoriamente de parcelas de trigo en estado de emergencia de la hoja bandera. La concentración de nutrientes y campos fueron determinadas por los métodos anteriores.

Enfoque analítico

La composición del tejido de la planta forma una disposición de nutrientes *d*-dimensional; es decir, simplex (S_d) compuesto por proporciones de nutrientes *d* + 1 que incluyen nutrientes *d*, y un valor de llenado (R_d) definido como (Parent y Dafir, 1992):

$$S_d = [(N,P,K,\dots,R_d):N>0,P>0,\dots R_d>0,N+P+K+\dots+R_d=100] \quad (1)$$

Donde 100 es la concentración de materia seca (%); N, P, K . . . son proporciones de nutrientes (%), y R_d es el valor de llenado calculado como:

$$R_d = 100-(N+P+K+\dots) \quad (2)$$

De acuerdo a la metodología CND

indices the closer to zero thus the CND r^2 or chi-square values are the higher probability of obtaining a high yield.

DRIS indices were calculated according to Beaufls (1973). The measure of the total nutritional imbalance, the nutrient imbalance index (NII), was calculated using the absolute values of the indices generated for the sample (Beaufls, 1973):

$$NII = |I_N| + |I_P| + |I_K| + |I_{Ca}| + |I_{Mg}| + |I_{Fe}| + |I_{Cu}| + |I_{Mn}| + |I_B| + |I_{Zn}| \quad (4)$$

Principal component analysis was performed on CND indices for high and low yielding subgroups and whole data to explore the correlation structure between CND indicators and nutrient interactions. The PC loadings having values greater than the selection criteria (SC) were given significance. The selection criterion was calculated as follows: (Raghuptahi *et al.*, 2005)

$$SC = \frac{0.5}{(PC \text{ eigen value})^{0.5}} \quad (5)$$

Excel software (as a component in Microsoft Office software 2010) and Statistical Product and Service Solutions (SPSS 23.0 software) were used for the purposes of the computations and statistical analysis of data.

Results and discussion

The compositional nutrient diagnosis norms. The eleven-dimensional ($d+1$) wheat (*T. aestivum* L.) simplex comprised the 10 nutrients N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, Fe and B, and the filling value R . Nutrients

propuesta por Parent y Dafir (1992), relación logarítmica centrada en filas calculada para la concentración de nutrientes crudos. A partir de entonces, la base de datos se divide entre dos subgrupos utilizando el procedimiento de Cate-Nelson, una vez que las observaciones se han clasificado en un orden de rendimiento decreciente.

Las normas CND se calcularon utilizando las medias y desviaciones estándar correspondientes a las relaciones logarítmicas centradas en filas V_X de los nutrientes d para especímenes de alto rendimiento, el índice de desequilibrio de nutrientes CND de un espécimen diagnosticado es su CND r^2 y se calcula mediante:

$$r^2 = I_N^2 + I_P^2 + I_K^2 + I_{Ca}^2 + I_{Mg}^2 + I_{Fe}^2 + I_{Zn}^2 + I_{Mn}^2 + I_{Cu}^2 + I_B^2 + I_{Rd}^2 \quad (3)$$

Debido a que los índices CND son variables normales unitarias independientes, los valores CND r^2 deben tener una función de distribución de chi-cuadrado. Con índices CND más cercanos a cero, los valores CND r^2 o chi-cuadrado son la mayor probabilidad de obtener un alto rendimiento.

Los índices DRIS fueron calculados de acuerdo a Beaufls (1973). La medida del desequilibrio nutricional total y del índice del desequilibrio de nutrientes (NII), se calculó utilizando los valores absolutos de los índices generados por la muestra (Beaufls, 1973):

$$NII = |I_N| + |I_P| + |I_K| + |I_{Ca}| + |I_{Mg}| + |I_{Fe}| + |I_{Cu}| + |I_{Mn}| + |I_B| + |I_{Zn}| \quad (4)$$

El análisis de componentes principales (PC) se desarrolló en índices de CND para subgrupos

Table 2. Wheat yield in inflection point of cumulative variance ratio functions.

Cuadro 2. Rendimiento del trigo en el punto de inflexión de las funciones de proporción de la varianza acumulada

Nutrients		R ²	Yield in inflection point (kg ha ⁻¹)
N	$y = 1.38x^3 - 17.845x^2 + 49.474x + 49.525$	0.991	4310
P	$y = 2.887x^3 - 35.453x^2 + 110.48x - 5.447$	0.995	4093
K	$y = -0.247x^3 + 2.306x^2 - 24.272x + 129.7$	0.991	3110
Ca	$y = 3.232x^3 - 39.84x^2 + 126.293x - 18.247$	0.995	4108
Mg	$y = 2.583x^3 - 29.58x^2 + 78.286x + 39.437$	0.993	3816
Cu	$y = 2.189x^3 - 27.67x^2 + 84.445x + 22.468$	0.997	4213
Mn	$y = 2.456x^3 - 32.608x^2 + 109.76x - 10.112$	0.997	4425
Fe	$y = 2.0664x^3 - 24.867x^2 + 67.224x + 47.084$	0.997	4008
Zn	$y = 2.069x^3 - 25.561x^2 + 72.475x + 42.337$	0.991	4116
B	$y = -0.1996x^3 + 3.6244x^2 - 30.531x + 95.32$	0.823	6052
Rd	$y = 2.7602x^3 - 35.593x^2 + 117.27x - 16.016$	0.997	4298

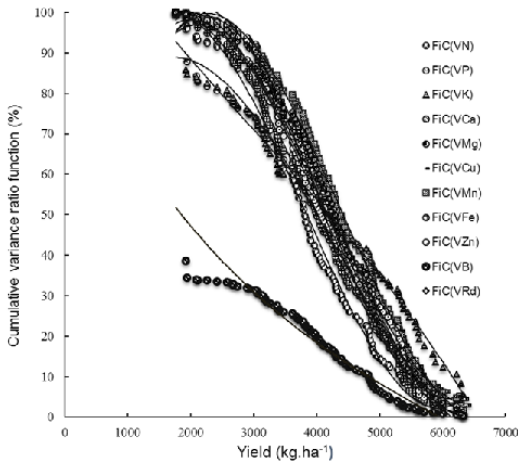


Figure 1. The relationship between yield and the cumulative variance ratio function for 11 nutrients.

Figura 1. Relación entre el rendimiento y la función de proporción de varianza acumulada para 11 nutrientes.

concentrations were transformed into CND row-centered log ratios and the cumulative variance ratio functions $[FiC(V_x)]$ values calculated (table 2). The relationship between cumulative variance function and yield was cubic and the inflection point $(-b/3a)$ is presented in figure 1.

Discrimination between the low and the high-yielding subgroups was made by mean of yield inflection points (4,232 kg.ha⁻¹). This result implies that 44.8 % of the samples (43

de alto y bajo rendimiento y datos completos para explorar la estructura de correlación entre los indicadores de CND y las interacciones de nutrientes. Se les dio significancia a las cargas de PC que tenían valores superiores a los criterios de selección (SC). El criterio de selección se calculó de la siguiente manera: (Raghuptahi *et al.*, 2005)

$$SC = \frac{0,5}{(PC \text{ eigen value})^{0,5}} \quad (5)$$

Table 3. Mean and standard deviation of wheat plant nutrients at high and low- yielding subgroup.

Cuadro 3. Desviación media y estándar para los nutrientes de la planta de trigo en el subgrupo de alto y bajo rendimiento.

Parameter	High yield		Low yield	
	Mean	SD	Mean	SD
N (g.kg ⁻¹)	23.3	6.2	22.2	6.7
P (g.kg ⁻¹)	3.6	1.1	3.6	1.0
K (g.kg ⁻¹)	22.0	7.3	21.6	7.6
Ca (g.kg ⁻¹)	6.0	1.6	6.1	1.3
Mg (g.kg ⁻¹)	5.7	1.5	5.8	1.6
Cu (mg.kg ⁻¹)	6.18	2.5	7.3	3.4
Mn (mg.kg ⁻¹)	18.2	5.6	17.9	5.4
Fe (mg.kg ⁻¹)	81.2	38.1	77.1	37
Zn (mg.kg ⁻¹)	9.5	2.6	6.86	8.4*
B (mg.kg ⁻¹)	6.04	2.53	6.61	2.3
R _d	93.92	0.94	94.06	1.06

*: Significant difference at $p < 0.05$

*: Diferencia significativa a $p < 0.05$

observations from 96) is considered as the high-yielding subgroup. The high yielding subgroup had significantly higher Zn ($P \leq 0.05$) compared to the low-yielding subgroup. Average

Se utilizó Excel (como componente del software Microsoft Office 2010), Statistical Product y Service Solutions (software SPSS 23.0) para los cálculos y el análisis estadístico de los datos.

concentrations of other nutrients did not differ significantly ($P \leq 0.05$) between the two subgroups (table 3).

The CND norms, as means and standard deviations of the CND row-centered log ratios for the high-yielding subgroup, are showed in table 4. These were used to estimate nutrients indices and $CNDr^2$ values. According to the average concentration and norms of CND, nutrients concentrations in wheat samples with high yield were near the adequate nutrient range mentioned in the literature. There are differences between studies regarding nutrient concentration in the high-yielding subgroup and about the defined adequacy range of nutrient

Resultados y discusión

Normas para el diagnóstico de la composición nutricional

Las once dimensiones ($d+1$) de trigo simple (*T. aestivum* L.) estaban compuestas por 10 nutrientes N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, Fe y B, y el valor de llenado R. Las concentraciones de nutrientes se transformaron en relaciones logarítmicas centradas en filas de CND y se calcularon las funciones de relación de varianza acumulada [FiC(Vx)] (cuadro 2). La relación entre la función de varianza acumulada y el rendimiento fue cúbica y el punto de inflexión ($-b / 3a$) se presenta en la figura 1.

Table 4. CND norms of nutrients for wheat production with a yield cutoff value of 4,232 kg.ha⁻¹.

Cuadro 4. Normas CND de nutrientes para la producción de trigo con un valor de rendimiento de corte de 4.232 kg.ha⁻¹.

	V _N [*]	V _P [*]	V _K [*]	V _{Ca} [*]	V _{Mg} [*]	V _{Cu} [*]	V _{Mn} [*]	V _{Fe} [*]	V _{Zn} [*]	V _B [*]	V _{Rd} [*]	ΣVx
Mean	3.51	1.64	3.43	2.16	2.11	-4.76	-3.64	-4.65	-4.82	-2.25	7.25	0.00
SD	0.31	0.32	0.36	0.28	0.24	0.38	0.24	0.36	0.53	0.39	0.11	-

CND: Compositional Nutrient Diagnosis

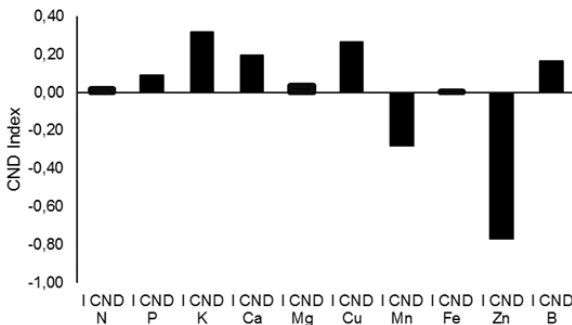


Figure 2. Mean values of nutrient index for the flag leaf tissue.

Figura 2. Valores medios del índice de nutrientes para el tejido de la hoja bandera.

concentrations. This is due to the difference in environmental conditions and the plant varieties (Quintanar *et al.*, 2006; Wairegi and Asten, 2011). The average of the nutrient indices in figure 2 shows that the nutritional requirements are as follows: Zn> Mn> Fe> N> Mg> P> B> Ca> Cu.

The survey showed that 55.2 % of observations relating to the yield, were following below 4,232 kg.ha⁻¹. Chi-square or χ^2 value of the

La discriminación entre los subgrupos de alto y bajo rendimiento se realizó por la media de los puntos de inflexión del rendimiento (4.232 kg.ha⁻¹). Este resultado implica que el 44,8 % de las muestras (43 observaciones de 96) sea considerado como un subgrupo de alto rendimiento. El subgrupo de alto rendimiento tuvo un Zn ($P \leq 0,05$) significativamente más alto en comparación al subgrupo de bajo rendimiento. Las concentraciones

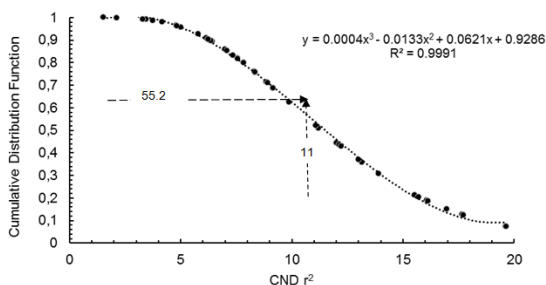


Figure 3. Comparison between the chi-square cumulative function and the CND r^2 distribution function to obtain the theoretical threshold CND r^2 value (11.04) at yield cutoff in the survey population (n=96).

Figura 3. Comparación entre la función acumulada de chi-cuadrado y la función de distribución CND r^2 para obtener el valor umbral teórico CND r^2 (11,04) en el rendimiento de corte en la población evaluada (n = 96).

corresponding theoretical low-yielding percent (55.2 %) with 12 degrees of freedom obtained 11.04 (figure 3). higher yield targets would increase the proportion of low-yield specimens in a population and produce narrower critical nutrient ranges (Khiari *et al.*, 2001c).

promedios de otros nutrientes no difirió significativamente ($P \leq 0,05$) entre los dos subgrupos (cuadro 3).

Las normas de CND, como medias y desviaciones standard de las relaciones logarítmicas centradas en filas CND para el subgrupo de alto rendimiento se muestran en el cuadro 4. Estos

The DRIS norms, i.e. means and CVs of the selected nutrients ratios, for high-yielding subgroup are presented in table 5. The norms are used for nutrients imbalance indices (NII).

Linear regression correlating CND to DRIS is shown in figure 4. The r^2 was 0.92 for relationships between CND and DRIS, for nutrient indices.

The linear regression with high r^2 showed a close relationship between nutrient CND and DRIS indices. It can be stated that the CND and DRIS methods presented similar diagnosis of nutrients balances. The CND critical index (I_x) of each nutrient was calculated from samples belonging to the low-yielding subgroup that shows nutrients imbalance in this subgroup. The interpretation of compositional nutrient diagnosis methods is based on CND indices (I_x) which are the ratios of the distance of a nutrient from its geometric mean to the distance of the same nutrient from high-yielding subgroup geometric mean. The mentioned index depends not only on the nutrient level but also on the relative position of the low-yielding subgroup geometric mean compared to the high-yielding subgroup geometric mean. Critical indices compare the nutrient level and nutrient balance (Parent and Dafir, 1992). Studies show that the relationship between nutrient balance index and nutrient concentration in the low-yielding subgroup follows the logarithmic model. The crossing point of the logarithmic curve with the horizontal axis indicates the zero index that represents a balanced nutrient concentration (table 6). Nutrient

fueron usados para estimar los índices de nutrientes y los valores $CNDr^2$. De acuerdo al promedio de concentración y normas CND , las concentraciones de nutrientes en muestras de trigo con alto rendimiento fueron cercanas al intervalo adecuado de nutrientes mencionados en la literatura. Existen diferencias entre estudios con respecto a la concentración de nutrientes en el subgrupo de alto rendimiento y sobre el rango definido de adecuación de concentraciones de nutrientes. Esto es debido a la diferencia de condiciones ambientales y variedades de plantas (Quintanar *et al.*, 2006; Wairegi y Asten, 2011). El promedio de los índices de nutrientes en la figura 2, muestra que los requerimientos nutricionales son los siguientes: $Zn > Mn > Fe > N > Mg > P > B > Ca > Cu$.

La encuesta mostró que el 55,2% de las observaciones relacionadas con el rendimiento, seguían por debajo de $4.232 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. El valor de Chi-cuadrado o $CND r^2$ del correspondiente porcentaje teórico de bajo rendimiento (55,2%) con 12 grados de libertad obtuvo 11,04 (figura 3). Los objetivos de mayor rendimiento aumentarían la proporción de especímenes de bajo rendimiento en una población, y producirían rangos de nutrientes críticos más estrechos (Khiari *et al.*, 2001c).

Las normas DRIS, las medias i.e. y CVs de las proporciones de nutrientes seleccionadas para el subgrupo de alto rendimiento son presentadas en el cuadro 5. Las normas son utilizadas para los índices de desequilibrio de nutrientes (NII).

Table 5. DRIS norms of nutrients dual ratio in high-yielding subgroup.**Cuadro 5. Normas DRIS de proporción dual de nutrientes en el subgrupo de alto rendimiento.**

Ratio	Mean	CV	Ratio	Mean	CV
N/P	7.2	49.8	Ca/Mg	1.11	33.6
N/K	1.22	51.9	Cu/Ca	0.00111	49.7
Ca/N	0.27	34.3	Mn/Ca	0.00329	43.4
N/Mg	4.37	40.3	Ca/Fe	93.9	47.1
Cu/N	0.00029	54.8	Zn/Ca	0.00123	46.8
Mn/N	0.00086	46.8	B/Ca	0.00111	63.5
N/Fe	360.89	46.3	Ca/Rd	0.00642	26.7
Zn/N	0.00033	55.7	Cu/Mg	0.00118	56.5
B/N	0.00029	62.5	Mg/Mn	338.0	33.8
Rd/N	43.97	34.7	Fe/Mg	0.01447	57.9
P/K	0.19	61.4	Zn/Mg	0.00125	39.2
Ca/P	1.88	53.7	B/Mg	0.00110	46.5
Mg/P	1.77	47.8	Rd/Mg	175.7	28.5
Cu/P	0.00185	48.9	Cu/Mn	0.34656	35.7
Mn/P	0.00550	42.1	Cu/Fe	0.09348	46.1
P/Fe	56.1	48.3	Cu/Zn	1.08212	65.6
Zn/P	0.00207	46.4	B/Cu	1.14644	54.5
B/P	0.00184	53.7	Cu/Rd	6.58E-06	40.6
Rd/P	291.3	41.8	Fe/Mn	4.40174	46.1
Ca/K	0.310	45.6	Zn/Mn	0.39338	36.3
Mg/K	0.296	51.6	B/Mn	0.35867	48.7
Cu/K	0.00032	58.6	Mn/Rd	1.94E-05	30.8
Mn/K	0.00094	48.1	Zn/Fe	0.10133	45.7
Fe/K	0.00402	65.8	B/Fe	0.09552	58.5
Zn/K	0.00035	50.4	Rd/Fe	14413.1	34.9
B/K	0.00031	53.0	B/Zn	1.00980	55.1
Rd/K	49.0	45.9	Zn/Rd	7.31E-06	37.2
			B/Rd	6.43E-06	41.9

DRIS: Diagnostic and Recommendation Integrated System, Rd: filling value.

DRIS: Sistema integrado de diagnóstico y recomendación, Rd: valor de llenado.

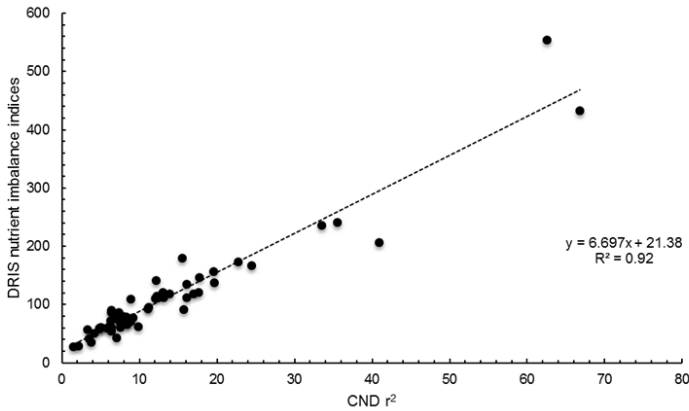


Figure 4. Relationship between nutrients imbalance indices (NII) of DRIS and CND r^2 .

Figura 4. Relación entre los índices de desequilibrio de nutrientes (NII) de DRIS y CND r^2 .

Table 6. The regression relationship between nutrient balance index and nutrient concentration in the low-yielding subgroup.

Cuadro 6. Relación de regresión entre el índice de equilibrio de nutrientes y la concentración de nutrientes en el subgrupo de bajo rendimiento.

Nutrient	Regression equation	r^2	Balanced nutrient concentration
Nitrogen	$CND I_N = 2.52\ln(x) - 2.16$	0.86	2.35
Phosphorus	$CND I_P = 3.83\ln(x) + 3.37$	0.90	0.41
Potassium	$CND I_K = 2.31\ln(x) - 1.60$	0.94	2.00
Calcium	$CND I_{Ca} = 2.99\ln(x) + 1.55$	0.79	0.59
Magnesium	$CND I_{Mg} = 4.58\ln(x) + 2.42$	0.86	0.59
Copper	$CND I_{Cu} = 2.25\ln(x) - 3.89$	0.93	5.61
Manganese	$CND I_{Mn} = 3.34\ln(x) - 9.72$	0.79	18.34
Iron	$CND I_{Fe} = 2.23\ln(x) - 9.43$	0.92	67.75
Zinc	$CND I_{Zn} = 2.04\ln(x) - 3.79$	0.96	6.43
Born	$CND I_B = 1.47\ln(x) - 2.48$	0.92	5.42

concentrations corresponding to the crossing point are indicated in table 3. This curve can represent the new

La correlación de la regresión lineal entre CND y DRIS se muestra en la figura 4. La r^2 fue 0,92 para las

Table 7. Wheat yield in inflection point of cumulative variance ratio functions at validation population.**Cuadro 7. Rendimiento de trigo en el punto de inflexión de las funciones de proporción de la varianza acumulada en la población de validación.**

Nutrients	$F_i(V_x) = aY^3 + bY^2 + cY + d$	r^2	Yield in inflection point (mg.kg ⁻¹)
N	$y = 1.3729x^3 - 21.989x^2 + 89.138x - 4.3401$	$r^2 = 0.99$	5339
P	$y = 1.4491x^3 - 18.933x^2 + 50.571x - 78.811$	$r^2 = 0.98$	4355
K	$y = 1.8032x^3 - 22.887x^2 + 60.647x + 78.357$	$r^2 = 0.97$	4231
Ca	$y = 1.7133x^3 - 27.805x^2 + 119.67x - 54.042$	$r^2 = 0.99$	5410
Mg	$y = 1.0845x^3 - 15.131x^2 + 42.123x + 76.085$	$r^2 = 0.99$	4651
Fe	$y = 0.5391x^3 - 9.457x^2 + 33.231x + 54.21$	$r^2 = 0.99$	5847
Zn	$y = -0.5713x^3 + 10.613x^2 - 74.717x + 202.29$	$r^2 = 0.99$	6192
Mn	$y = 0.6638x^3 - 9.3252x^2 + 18.635x + 104.59$	$r^2 = 0.99$	4683
Cu	$y = 1.6971x^3 - 23.169x^2 + 72.942x + 46.57$	$r^2 = 0.98$	4551
B	$y = 1.8987x^3 - 29.515x^2 + 121.04x - 46.931$	$r^2 = 0.99$	5182
Rd	$y = 2.2681x^3 - 32.753x^2 + 123.26x - 34.191$	$r^2 = 0.98$	4814

method for determination of the optimized concentration for maximum yield.

Validate the threshold nutrient imbalance index

In the validation population, the mean yield cutoff value (5,023 mg.kg⁻¹) used to divide the high- and low-yield groups was calculated by cumulative variance ratio functions (Khiari *et al.*, 2001a) (table 7).

Average concentrations of nutrients did not differ significantly between the two subgroups (table 8). This result showed that nutrients application in the validation trials caused to nutrients concentration closed to each other in the two subgroups, therefore nutrients composition were balanced.

Nutrient sufficiency ranges were obtained by the squared values of CND nutrient indexes (I_x) (table 9). The

relaciones entre CND y DRIS para los índices de nutrientes.

La regresión lineal con r^2 alto mostró una relación cercana entre los índices de nutrientes de CND y DRIS. Se puede decir que los métodos CND Y DRIS presentaron un diagnóstico similar a los balances de nutrientes. El índice crítico CND (I_x) de cada nutriente fue calculado a partir de cada muestra correspondiente al subgrupo de bajo rendimiento, lo cual muestra el desequilibrio de nutrientes de este subgrupo. La interpretación de los métodos de diagnóstico de la composición de nutrientes está basada en los índices CND (I_x) los cuales son las proporciones de la distancia de un nutriente desde su media geométrica a la distancia del mismo nutriente desde la media geométrica del subgrupo de alto rendimiento. El índice mencionado

CND_r² imbalance index is amenable to CND index ranges defined on a theoretical basis. Additive critical CND values mean that critical I_x ranges between -I_x and +I_x could be obtained simply by computing the square root of. This method for nutrient balances contrasts with the DRIS concept that the more negative an index is, the more deficient the nutrient. CND would provide a simple

no depende solamente del nivel del nutriente sino también de la posición relativa de la media geométrica del subgrupo de bajo rendimiento en comparación a la media geométrica del subgrupo de alto rendimiento. Los índices críticos comparan el nivel de nutrientes y el equilibrio de nutrientes (Parent y Dafir, 1992). Estudios demuestran que la relación entre el índice de equilibrio de nutrientes y

Table 8. Mean and standard deviation of wheat plant nutrients at high and low- yielding validation subgroup.

Cuadro 8. Desviación media y estándar de los nutrientes de las plantas de trigo en el subgrupo de validación de alto y bajo rendimiento.

Parameter	High yield		Low yield	
	Mean	SD	Mean	SD
N (g.kg ⁻¹)	24.60	7.20	22.30	7.40
P (g.kg ⁻¹)	3.90	1.50	4.00	2.00
K (g.kg ⁻¹)	24.00	5.80	22.50	7.40
Ca (g.kg ⁻¹)	6.60	2.60	6.60	2.50
Mg (g.kg ⁻¹)	5.50	2.20	5.60	2.60
Cu (mg.kg ⁻¹)	12.65	4.88	12.28	4.14
Mn (mg.kg ⁻¹)	37.54	10.24	35.04	10.32
Fe (mg.kg ⁻¹)	120.84	60.38	124.84	47.95
Zn (mg.kg ⁻¹)	29.25	8.98	28.85	8.41
B (mg.kg ⁻¹)	8.97	1.91	8.52	1.97
R _d	93.51	0.81	93.88	1.16

and cost-effective tool for diagnosing nutrient imbalance in a large number of specific soil-plant systems with small databases (Khiari *et al.*, 2001b).

In validation population 104 of the 144 specimens, or 72 % of the population, was below yield cutoff of 5,023 kg.ha⁻¹. The corresponding chi-square or CND_r² value was 9.08

la concentración de nutrientes en subgrupos de bajo rendimiento sigue el modelo logarítmico. El punto de cruce de la curva logarítmica con el eje horizontal indica el índice cero que representa una concentración equilibrada de nutrientes (cuadro 6). Las concentraciones de nutrientes correspondientes al punto de cruce

(figure 5). Given the reduction of the CND r^2 value, it is determined that the nutrients with the fertilizer application trials have been more balanced. Theoretically, at the critical

se indican en el cuadro 3. Esta curva puede representar el nuevo método para la determinación de la concentración optimizada para un rendimiento máximo.

Table 9. Critical squared compositional nutrient diagnosis (CND) indexes and sufficiency ranges in the validation samples.

Cuadro 9. Índices de diagnóstico de composición de nutrientes (CND) al cuadrado crítico y rangos de suficiencia en las muestras de validación.

CND index	Critical value of CND r^2	Critical ranges	
		Upper limit	Lower limit
	0.95	0.98	-0.98
	0.62	0.79	-0.79
	0.69	0.83	-0.83
	0.71	0.84	-0.84
	0.98	0.99	-0.99
	0.75	0.86	-0.86
	0.86	0.93	-0.93
	0.81	0.90	-0.90
	0.87	0.93	-0.93
	1.03	1.02	-1.02
	0.82	0.91	-0.91
Sum CND r^2	9.08	9.97	

chi-square value of zero where the ideal nutrient balance is reached, 100 % of the population would be expected to produce below- cutoff yield by definition (Khiari *et al.*, 2001a).

Nutrient interactions

Principal component analysis (PCA) was conducted on CND indices related to the whole data set including high and low yielding subgroups. Significant factor loadings were obtained after the varimax rotation (Gutiérrez-Acosta *et al.*, 2002). The first three factors in high and low yielding subgroups in whole data

Validación del índice umbral del desequilibrio de nutrientes

En la población de validación, el valor de la media de rendimiento de corte (5,023 mg.kg⁻¹) utilizada para dividir el alto y bajo rendimiento de los grupos fue calculado por funciones de proporción de varianzas acumuladas (Khiari *et al.*, 2001a) (cuadro 7).

Las concentraciones promedio de nutrientes no difirieron significativamente entre los dos subgrupos (cuadro 8). Este resultado mostró que la aplicación de nutrientes en los ensayos de validación, causó una

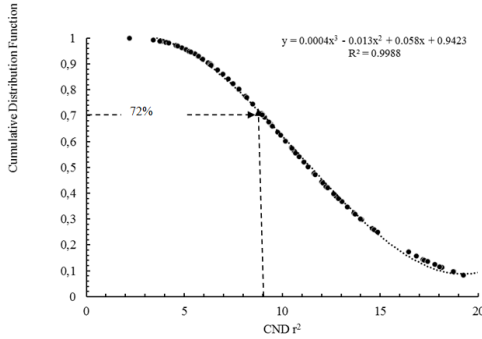


Figure 5. Application cumulative function to obtain the theoretical threshold CND r^2 value (9.08) at yield cutoff in the validation population (n=144).

Figura 5. Aplicación de la función acumulada para obtener el valor umbral teórico CND r^2 (9,08) en el rendimiento de corte en la población de validación (n = 144).

Table 10. Principal component analysis of nutrient concentration for CND indices.

Cuadro 10. Análisis de componentes principales de la concentración de nutrientes para índices CND.

Index	High yielding subgroup			Low yielding subgroup			Total population		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
I_N	-0.085	0.785	0.060	-0.046	-0.700	-0.261	-0.338	-0.117	0.638
I_P	0.476	-0.106	-0.272	0.001	-0.577	0.344	0.031	0.186	0.490
I_K	-0.297	0.079	0.075	0.079	0.001	0.674	0.045	-0.597	0.062
I_{Ca}	-0.318	0.699	0.065	0.730	-0.052	0.352	-0.517	0.461	0.189
I_{Mg}	-0.544	-0.068	-0.329	-0.791	0.056	0.052	0.640	0.232	-0.308
I_{Cu}	0.817	0.159	0.087	-0.628	0.343	0.224	0.772	0.160	0.035
I_{Mn}	0.623	-0.228	0.416	-0.470	0.548	-0.013	0.675	-0.116	-0.071
I_{Fe}	-0.136	-0.285	0.751	-0.123	0.032	-0.747	0.001	-0.742	0.026
I_{Zn}	-0.336	-0.643	0.229	-0.617	-0.179	-0.163	0.210	-0.535	-0.005
I_B	-0.139	-0.224	-0.781	0.415	-0.548	-0.364	-0.231	0.026	-0.775
Eigen value	2.103	1.738	1.437	2.456	1.634	1.376	2.183	1.430	1.269
% Variance	21.027	17.383	14.370	24.556	16.342	13.755	21.834	14.296	12.691
Selection criteria	0.345	0.379	0.417	0.319	0.391	0.426	0.338	0.418	0.444
	PC1=P+Cu+Mn+Mg-			PC1=Ca+ B+ Mg-Cu-Mn-Zn-			PC1=Mn+Cu+Ca-Mg+		
	PC2=N+Ca+Zn-			PC2=Mn+N-P-B-			PC2= Ca+ K-Fe-Zn-		
	PC3=Fe+B-			PC3=K+Fe-			PC3=N+P+B-		

explained 52.8, 54.6 of the total variance, respectively, and 48.8 % of the total variance of the total population (table 10).

The first principal component of the total data set showed a negative and positive correlation between nutrients that was designated as (Ca-Mg+Cu+Mn+). In the second PC nutrition interaction was defined as (Ca+K-Fe-Zn-) and in the third component change of nutrients was defined as (N+P+B-). The principal component analysis resulted in positive and negative correlations in the high yield subgroup indicating positive and negative interactions between nutrients. The correlations were presented in three PCs as follow: PC1 (P+Cu+Mn+Mg-), PC2 (N+Ca+Zn-) and PC3 (Fe+B-). Positive and negative nutrient correlations in the low-yielding subgroup were shown as follows: the PC1 (Ca+B+Mg-Cu-Zn-), PC2 (Mn+N-P-B-) and PC3 (K+F-). Investigation of the factor loadings resulting from the analysis of three sets of data showed that there were negative interactions between macronutrients and micronutrients.

It is well known that the optimum plant growth depends not only on the total amount of nutrients but also on their availability. Nutrients availability is controlling by physico-chemical properties soil such as texture classes, organic carbon, calcium carbonate, pH and electrical conductivity (Bell and Dell, 2008). The soils of studied region were characterized by low organic carbon content, high pH and salinity/alkalinity problems (table

concentración cerrada entre los dos subgrupos, por lo que la composición de nutrientes fue equilibrada.

Los rangos de suficiencia de nutrientes se obtuvieron mediante los valores al cuadrado de los índices de nutrientes CND (Ix) (cuadro 9). El índice de desequilibrio CND r^2 es susceptible a los rangos de índice CND definidos sobre una base teórica. Los valores críticos aditivos de significan que los rangos críticos de Ix entre -Ix y + Ix podrían obtenerse simplemente calculando la raíz cuadrada de . Este método para equilibrios de nutrientes contrasta con el concepto DRIS de que cuanto más negativo es un índice, más deficiente es el nutriente. La CND proporcionaría una herramienta simple y rentable para diagnosticar el desequilibrio de nutrientes en una gran cantidad de sistemas específicos suelo-planta con pequeñas bases de datos (Khiari *et al.*, 2001b).

En la población de validación 104 de 144 especímenes, o 72% de la población, estuvo bajo un rendimiento de corte de 5.023 kg.ha⁻¹. El valor correspondiente al chi-cuadrado o CND r^2 fue 9,08 (figura 5). Dada la reducción del valor de CND t^2 , se determinó que los nutrientes con los ensayos de aplicación de fertilizantes han sido más equilibrados. Teóricamente, en el valor crítico de chi-cuadrado de cero donde se alcanza el equilibrio ideal de nutrientes, se esperaría que el 100% de la población produjera un rendimiento de corte por debajo del límite por definición (Khiari *et al.*, 2001a).

Interacciones de nutrientes

El análisis de componentes principales (PCA) se llevó a cabo

1). These soil conditions are not favorable for adequate availability of micronutrients.

Application of N increases the uptake of P and Ca. Nitrogen increases the root hair, causes chemical changes in the rhizosphere and physiological changes in the plant. Such factors improve absorption of macronutrients (Baligar *et al.*, 2001). The interaction between N and micronutrients depends on pH changes in the rhizosphere. Nitrogen is absorbed as nitrate and increases the pH of the rhizosphere, and thus reduces the absorption of most micronutrients. Plants absorb K more efficiently than Fe. High K prevents Fe uptake and transport in plants, causing Fe deficiency. The researchers reported that the use of Fe as well as K in soil increases sorghum yield (Matocha and Thomas, 1969). Soils having low Zn concentration enhanced the B concentration in wheat (Singh *et al.*, 1990). High Ca concentration prevents Mg absorption. The decrease of Mg absorption occurs due to the competition between Ca and Mg for same absorption sites (Maas and Ogata, 1971). In wheat, Cu imposes positive effects on P uptake and significant negative effect on the absorption of Ca and Mg (Fageria, 2009). The researchers stated that there are antagonistic relationship between B and Zn, as well as between Fe and Mn (Zaharieva, 1986; Chinnery and Harding 1980 and Singh *et al.*, 1990). Interactions between B and P are not clear. Phosphorus may increase or decrease B uptake or have no effect on it. It has been found that the use of P prevents toxic accumulation of B

en los índices CND relacionados al conjunto de datos completo que incluye subgrupos de alto y bajo rendimiento. Se obtuvieron cargas factoriales significativas después de la rotación varimax (Gutiérrez-Acosta *et al.*, 2002). Los primeros tres factores en los subgrupos de alto y bajo rendimiento en los datos completos explicaron el 52,8, el 54,6 de la varianza total, respectivamente, y el 48, 8% de la varianza total de la población total (cuadro 10).

El componente principal del conjunto de datos totales mostró una correlación negativa y positiva entre los nutrientes que fueron designados como (Ca-Mg+Cu+Mn+). En el segundo PC la interacción nutricional fue definida como (Ca+K-Fe-Zn-) y en el tercer componente el cambio de nutrientes fue definida como (N+P+B). El análisis del componente principal resultó en correlaciones positivas y negativas en subgrupos de alto rendimiento indicando interacciones positivas y negativas entre nutrientes. Las correlaciones se presentaron en tres PCs de la siguiente manera: PC1 (P+Cu+Mn+Mg-), PC2 (N+Ca+Zn-) y PC3 (Fe+B-). Correlaciones de nutrientes positivas y negativas en subgrupos de bajo rendimiento se mostraron de la siguiente manera: El PC1 (Ca+B+Mg-Cu-Zn-), PC2 (Mn+N-P-B-) y PC3 (K+F-). La investigación de las cargas factoriales resultantes del análisis de tres conjuntos de datos mostró que habían interacciones negativas entre macronutrientes y micronutrientes.

Es bien conocido que el crecimiento óptimo de la planta no solo depende

in plants (Gunes and Alpaslan, 2000). Fageria (2009) reported that reduction in the absorption of Ca by increasing the K concentration in the growth medium reflects their competitive absorption pattern.

Conclusion

Results of CND norms showed imbalances nutrient in the studied region. The zinc and nitrogen in soils are respectively deficient and adequate. Therefore, application of zinc especially and other micronutrient fertilizers must be applied at appropriate times. Comparison CND r^2 in the surveyed fields and validation trial indicated that application micronutrient fertilizers decreased CND r^2 then nutrients were more balanced. The close relationship between the CND. r^2 and NII shows that both CND and DRIS methods produce similar diagnosis of nutrient balances. Principal component analysis (PCA) revealed that positive and negative interactions between nutrients which suggest that diagnosis of nutrients imbalance is impossible in isolation since a large number of nutrients either increase or decrease uptake of together in a clustered manner.

Acknowledgments

This paper is published as a part of a Ph.D. dissertation supported by the Vice Chancellor for Research and Technology of the University of Tabriz, Iran. The authors are thankful to

de la cantidad total de nutrientes sino también de su disponibilidad. La disponibilidad de nutrientes es controlada por propiedades fisicoquímicas del suelo, tales como: clases de textura, carbono orgánico, carbonato de calcio, pH y conductividad eléctrica (Bell y Dell, 2008). Los suelos de la región estudiada se caracterizaron por bajo contenido de carbono orgánico, pH alto y problemas de salinidad/ alcalinidad (cuadro 1). Estas condiciones del suelo no son favorables para una adecuada disponibilidad de micronutrientes.

La aplicación de N aumenta la captación de P y Ca. El nitrógeno aumenta los pelos absorbentes de la raíz, ocasiona cambios en la rizosfera y cambios fisiológicos en la planta. Tales factores mejoran la absorción de macronutrientes (Baligar *et al.*, 2001). La interacción entre N y los micronutrientes depende de los cambios de pH en la rizosfera. El nitrógeno es absorbido como el nitrato, y aumenta el pH de la rizosfera, por lo tanto reduce la absorción de la mayoría de los nutrientes. Las plantas absorben más contenido de K más eficientemente que de Fe. El alto contenido de K evita la absorción y el transporte de Fe en las plantas, lo que provoca una deficiencia de Fe. Los investigadores reportaron que el uso tanto de F como de K en el suelo aumenta el rendimiento del sorgo (Matocha y Thomas, 1969). Los suelos que tienen una concentración baja de Zn mejoraron la concentración de B en el trigo (Singh *et al.*, 1990). La alta concentración de Ca evita la absorción

the University of Tabriz for financial supports.

End of English Version

de Mg. La disminución en la absorción de Mg ocurre debido a la competencia entre Ca y Mg para los mismos lugares de absorción (Maas y Ogata, 1971). El trigo, impone efectos positivos sobre la absorción de P y un efecto negativo significativo sobre la absorción de Ca y Mg (Fageria, 2009). Los investigadores plantearon que existe una relación antagonista tanto entre B y Zn como entre Fe y Mn (Zaharieva, 1986; Chinnery y Harding 1980 y Singh *et al.*, 1990). Las interacciones entre B y P no son claras. El fósforo puede aumentar o disminuir la absorción de B o no puede tener efecto en él. Se ha encontrado que el uso de P, previene la acumulación tóxica de B en plantas (Gunes y Alpaslan, 2000). Fageria (2009) refirió que la reducción en la absorción de Ca por el aumento de la concentración de K en el crecimiento del medio refleja su patrón de absorción competitiva.

Conclusión

Los resultados de las normas CND mostraron desequilibrios de nutrientes en la región estudiada. El zinc y el nitrógeno en los suelos son respectivamente deficientes y adecuados. Por lo tanto, la aplicación de zinc específicamente y de otros fertilizantes de micronutrientes deben ser aplicados en tiempos apropiados. La comparación de CND r^2 en los campos evaluados y la validación del ensayo indicaron que la aplicación

de fertilizantes de micronutrientes disminuyeron CND r^2 , por lo tanto los nutrientes fueron más equilibrados. La relación cercana entre CND r^2 y NII muestra que ambos métodos de CND y DRIS producen un diagnóstico similar de balance de nutrientes. El análisis de componentes principales (PCA) reveló que hubo interacciones positivas y negativas entre los nutrientes, lo que sugiere que el diagnóstico del desequilibrio de nutrientes es imposible de forma aislada, ya que una gran cantidad de nutrientes aumentan o disminuyen la absorción juntos, de manera agrupada.

Agradecimientos

Este artículo es publicado como una parte de la tesis de doctorado apoyada por el Vicerrectorado de Investigación y Tecnología de la Universidad de Tabriz, Irán. Los autores agradecen a la Universidad de Tabriz por el apoyo financiero.

Literature cited

- Ali, A.M. 2018. Nutrient sufficiency ranges in Mango using boundary-line approach and compositional nutrient diagnosis norms in El-Salhiya, Egypt. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* Online publication.49:1-14
- Ali, A.M., S.M. Ibrahim and A.S.A. Sayed. 2016. Evaluation of nutritional balance in wheat using compositional nutrient diagnosis model in Sahl El-Tina, Egypt. *Alexandria Sci Exch. J.* 37(4):581-593.
- Bhargava, B.S. and H.B. Raghupathi. 1993. Analysis of plant material for macro- and micro-nutrients, pp. 49-82. *In: H.L.S. Tandon(ed.), Methods of Analysis of Soils, Plants, Waters*

- and Fertilizers. FDCO, New Delhi, India.*Banaii, M. 2000. Soil resource and use potentiality map of Iran. Soil and water research institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ministry of Agriculture-Jahad.
- Baligar, V.C., N.K. Fageria and Z.L. He. 2001. Nutrient use efficiency in plants: An overview. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.* 32:921–950.
- Bell, R.W. and B. Dell. 2008. Micronutrients for sustainable food, feed, fibre and bioenergy production. International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris, France.
- Beaufils, E.R. 1973. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) a general scheme for experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition. *Soil Science Bulletin* No1, Natal University, Pietermaritzburg.
- Chinnery, L.E.; Harding, C.P. 1980. The Effect of ferrous iron on the uptake of manganese by *Juncus effusus*. *Ann. Bot.* 46, 409- 412.
- Dezordi, L.R., L.A. Aquino, R.F.B.A. Aquino, J.M. Clemente and N.S. Assunção. 2016. Diagnostic Methods to Assess the Nutritional Status of the Carrot Crop. *Rev Bras Cienc Solo.* v40:e0140813.
- Fageria, N. K. 2009. The use of nutrients in crop plants. CRC Press. Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA. 448 p.
- Gott, R.M., L.A. Aquino, J.M. Clemente, L.P.D.D. Santos, A.M.X. Carvalho and F.O. Xavier. 2016. Foliar Diagnosis Indexes for Corn by the Methods Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) and Nutritional Composition (CND), *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 48:11-19
- Gunes, A. and M. Alpaslan. 2000. Boron uptake and toxicity in maize genotypes in relation to boron and phosphorus supply. *J. Plant Nutr.* 21:541–550.
- Gutiérrez-Acosta, F., R.D. Valdez-Cepeda, F. Blanco-Macias. 2002. Multivariate analysis of cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits from a germplasm collection. *Acta. Hortic.* 581, 111–118
- Hallmark, W.B. and R.B. Beverly. 1991. Review – An update in the use of the diagnosis and recommendation integrated system. *J. Fert. Issu.* 8:74-88.
- Khiari, L., L.E. Parent and N. Tremblay. 2001a. Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. *Agron. J.* 93:802-808.
- Khiari, L., L.E. Parent and N. Tremblay. 2001b. Critical compositional nutrient indexes for sweet corn at early growth stage. *Agron. J.* 93:809-814.
- Khiari, L., L.E. Parent and N. Tremblay. 2001c. The phosphorus compositional nutrient diagnosis range for potato. *Agron. J.* 93:815-819.
- Maas, E.V. and G. Ogata. 1971. Absorption of magnesium and chloride by excised corn roots. *Plant. Physiol.* 47:357–360.
- Matocha, J.E. and G.W. Thomas. 1969. Potassium and organic nitrogen content of grain sorghum as affected by iron. *Agron. J.* 61:425-428.
- Njoroge, R., A.N. Otinga, J.R. Okalebo, M. Pepela and R. Merckx. 2017. Occurrence of poorly responsive soils in western Kenya and associated nutrient imbalances in maize (*Zea mays* L.) *Field Crops Res.* 210:162–174.
- Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. 1982. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Parent, L.E., D. Irfan, N. Tremblay and A. Karam. 1994. Multivariate nutrient diagnosis of the carrot crop. *J. Am. Soci. Hort. Sci.* 119:420-426.
- Parent, L.E. and M. Dafir. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 117:239-242.

- Quintanar, R.M., R.D.V. Cepeda, E.O. Saenz, O.P. Veyna, J.L.G. Hernández and J.D.L. Martínez. 2006. Compositional nutrient diagnosis in maize grown in a calcareous soil. *J. Plant Nutr.* 29:2019-2033.
- Raghuptahi, H.B., Y.T.N. Reddy, R.M. Kurian and B.S. Bhargava. 2005. Diagnosis of nutrient imbalance in mango by DRIS and PCA approaches. *J. Plant Nutr.* 27(7):1131-1148.
- Singh, D., P.K. Chhonkar and B.S. Dwivedi. 2005. Manual on soil, plant and water analysis. New Delhi, India: Westville Publishing House.
- Singh, J.P., D.J. Dahiya and R.P. Narwal. 1990. Boron uptake and toxicity in wheat in relation to zinc supply. *Fert. Res.* 24:105-110.
- Wairegi, L. and P.V. Asten. 2011 Norms for multivariate diagnosis of nutrient imbalance in the east African highland bananas (*Musa* spp. AAA). *J. Plant. Nutr.* 34:1453-1472.
- Yousef, M.N., S. Akter, M.I. Haque, N. Mohammad and M.S. Zaman. 2013. Compositional nutrient diagnosis (CND) of Onion (*Allium cepa* L.). *Bangladesh J. Agril. Res.* 38: 271-287.
- Zaharieva, T. 1986. Comparative studies of iron inefficient plant species with plant analysis. *J. Plant Nutr.* 9, 939-946.