

CULTIVO HIDROPÓNICO DE PLÁNTULAS DE JITOMATE EN ZEOLITA CARGADA CON K^+ , Ca^{2+} O Mg^{2+} Y DIFERENTE GRANULOMETRÍA

TOMATO SEEDLINGS SOILLESS CULTURE ON K^+ , Ca^{2+} OR Mg^{2+} LOADED ZEOLITE AND DIFFERENT GRANULE SIZE

Elizabeth Urbina-Sánchez¹, Gustavo A. Baca-Castillo², Roberto Núñez-Escobar²,
María T. Colinas-León³, Leonardo Tijerina-Chávez⁴ y Juan L. Tirado-Torres²

¹Fisiología Vegetal. (elizaurbina@yahoo.com), ²Edafología e ⁴Hidrociencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. ³Fisiología Vegetal. Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México.

RESUMEN

Las zeolitas son minerales del grupo de los aluminosilicatos hidratados con estructura porosa, presentan alta capacidad de retención de humedad y de intercambio catiónico. Sus características físicas y químicas las hacen un sustrato atractivo para cultivos hidropónicos. El estudio consistió en determinar las propiedades físicas y de intercambio de cationes de zeolita clinoptilolita, para posteriormente evaluarla como sustrato hidropónico cargada con K^+ , Ca^{2+} o Mg^{2+} , en cada caso, en tres granulometrías (0.71-1.00, 1.01-2.00 y 2.01-3.36 mm), mediante el rendimiento y la absorción nutrimental de plántulas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cv. Mitsuri. Para esta evaluación se usó un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 3^2 ; se probaron tres granulometrías de tezontle (lava volcánica porosa) como testigos. El K^+ fue el catión más eficiente ($p \leq 0.05$) para desplazar al Na^+ en la zeolita natural. Con las granulometrías fina y media se obtuvieron las plántulas de mayor tamaño ($p \leq 0.05$). Las zeolitas cargadas con K^+ o Mg^{2+} produjeron plántulas de mayor tamaño ($p \leq 0.05$) que las obtenidas en la zeolita cargada con Ca^{2+} . Las plántulas establecidas en el tezontle de granulometría gruesa tuvieron menor tamaño que las establecidas en las zeolitas.

Palabras clave: *Lycopersicon esculentum* Mill., absorción nutrimental, hidroponía, zeolita clinoptilolita.

INTRODUCCIÓN

Las zeolitas son minerales del grupo de los aluminosilicatos hidratados, con estructura porosa (porosidad mayor de 40%), que presentan alta capacidad de retención de humedad (25% p/p) y de intercambio catiónico ($160-200 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) (Bosch y Schifter, 1988; Nus y Brauen, 1991; Qian *et al.*, 2001). La porosidad de las zeolitas las distingue como sustratos potencialmente apropiados para usarse en cultivos hidropónicos (Steiner, 1976), y se utilizan como tales (Markovik *et al.*, 1997; Pavlovic *et*

ABSTRACT

Zeolites are minerals of the hydrated aluminosilicates group with porous structure, high cation exchange capacity and moisture retention. Their physical and chemical characteristics make them an attractive substrate for soilless culture. The study consisted of determining the physical properties and cation exchange of clinoptilolite zeolite, for its posterior evaluation as a soilless substrate, loaded with K^+ , Ca^{2+} or Mg^{2+} , each of them in three particle sizes: 0.71-1.00, 1.01-2.00 and 2.01-3.36 mm, on yield and nutrient absorption of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seedlings cv. Mitsuri. A complete factorial design 3^2 was used; three particle sizes of tezontle (porous volcanic lava) were also included as controls. K^+ was the most efficient cation ($p \leq 0.05$) to displace Na^+ in the natural zeolite. Zeolite loaded with K^+ or Mg^{2+} produced seedlings of greater size than those obtained with zeolite with Ca^{2+} . Seedlings established in tezontle of the largest particle size were shorter than those grown in the corresponding zeolite group.

Key words: *Lycopersicon esculentum* Mill., nutrient uptake, soilless culture, clinoptilolite zeolite.

INTRODUCTION

Zeolites are minerals of the hydrated aluminosilicates group, with porous structure (porosity of over 40%), which present high capacity of moisture retention (25% p/p) and cation exchange ($160-200 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) (Bosch and Schifter, 1988; Nus and Brauen, 1991; Qian *et al.*, 2001). The porosity of the zeolites distinguishes them as substrates that are potentially appropriate for use in soilless culture (Steiner, 1976), and are used as such (Markovik *et al.*, 1997; Pavlovic *et al.*, 1998). However, the information generated in México is scant.

The surface of cation exchange of the zeolites is occupied by Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} , which, with the exception of Na^+ , can be used by plants when zeolites are employed as substrates in soilless culture (Stamatakis *et al.*, 2001). These include clinoptilolite,

Recibido: Enero, 2005. Aprobado: Mayo, 2006.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 40: 419-429. 2006.

al., 1998). Sin embargo, la información generada en México es escasa.

La superficie de intercambio catiónico de las zeolitas está ocupada por Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , los cuales, con excepción del Na^+ , pueden ser aprovechados por las plantas cuando se emplean zeolitas como sustratos en cultivos hidropónicos (Stamatakis *et al.*, 2001). Entre éstas se encuentra la clinoptilolita, la cual contiene principalmente Na^+ , elemento fitotóxico para las plantas. Sin embargo, la zeolita puede ser tratada con una solución, para intercambiar el Na^+ por K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} .

El tamaño de las partículas está relacionado con las propiedades físicas y químicas de los sustratos. Según Ansorena (1994), el tamaño óptimo de partículas para sustratos hortícolas está entre 0.25 y 2.5 mm. Nus y Brauen (1991) estudiaron partículas de zeolita (0.25 a 0.5 mm) y encontraron que la mayor capacidad de intercambio catiónico y K^+ intercambiables se dio en partículas menores a 0.5 mm. Las partículas de tamaño uniforme mejoran el suministro de oxígeno a las raíces, en relación con mezclas de partículas de diferentes tamaños (Steiner, 1968; Biran y Eliassaf, 1980; Gislerød, 1997).

El estudio de las propiedades físicas y químicas de los sustratos es indispensable para evaluar su desempeño en cultivos hidropónicos. Además, es necesario evaluar directamente la respuesta de la planta, de la cual dependerá su manejo adecuado (Luque, 1981).

En México hay yacimientos de zeolitas en 18 Estados; los más estudiados, y posiblemente de mayor importancia, son los de Oaxaca y Sonora (Ostroumov *et al.*, 2005).

El objetivo del presente estudio fue determinar las propiedades físicas y de intercambio de cationes de zeolita clinoptilolita proveniente de Oaxaca, y evaluarla como sustrato en cultivo hidropónico, considerando tres granulometrías y su carga con K^+ , Ca^{2+} o Mg^{2+} , en términos de la absorción nutrimental y el crecimiento de plántulas de jitomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó zeolita natural procedente del poblado de Magdalena, municipio de ETLA, Oaxaca, México. Ésta se clasificó como zeolita clinoptilolita en función de la determinación de cationes adsorbidos cuya relación ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) fue: $(69.5 \text{ Na} + 7.8 \text{ K}) > 8.1 \text{ Ca}$ (Gottardi y Galli, 1985).

Para determinar las propiedades físicas y de intercambio de cationes de los materiales a usar como sustratos hidropónicos y relacionados con el experimento posterior, se molió y tamizó la zeolita obteniendo tres granulometrías, lo cual también se hizo con el tezontle (lava volcánica expandida), usado como testigo. Hubo dos factores: a) sustratos: zeolita y tezontle; b) granulometría de

la cual principalmente contiene Na^+ , un elemento fitotóxico para las plantas. Sin embargo, la zeolita puede ser tratada con una solución para intercambiar el Na^+ por K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} .

El tamaño de las partículas está relacionado con las propiedades físicas y químicas de los sustratos. Según Ansorena (1994), el tamaño óptimo de partículas para sustratos hortícolas está entre 0.25 y 2.5 mm. Nus y Brauen (1991) estudiaron partículas de zeolita (0.25 a 0.5 mm) y encontraron que la mayor capacidad de intercambio catiónico y K^+ intercambiables se dio en partículas menores a 0.5 mm. Las partículas de tamaño uniforme mejoran el suministro de oxígeno a las raíces, en relación con mezclas de partículas de diferentes tamaños (Steiner, 1968; Biran y Eliassaf, 1980; Gislerød, 1997).

El estudio de las propiedades físicas y químicas de los sustratos es indispensable para evaluar su desempeño en cultivos hidropónicos. Además, es necesario evaluar directamente la respuesta de la planta, de la cual dependerá su manejo adecuado (Luque, 1981).

En México, hay depósitos de zeolitas en 18 Estados; los más estudiados, y posiblemente los más importantes, son los de Oaxaca y Sonora (Ostroumov *et al.*, 2005).

El objetivo del presente estudio fue determinar las propiedades físicas y de intercambio de cationes de zeolita clinoptilolita proveniente de Oaxaca, y evaluarla como sustrato en cultivo hidropónico, considerando tres granulometrías y su carga con K^+ , Ca^{2+} o Mg^{2+} , en términos de la absorción nutrimental y el crecimiento de plántulas de jitomate.

MATERIALS AND METHODS

Natural zeolite was used from the town of Magdalena, municipality of ETLA, Oaxaca, Mexico. This was classified as clinoptilolite zeolite as a function of the determination of adsorbed cations, whose ratio ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) was: $(69.5 \text{ Na} + 7.8 \text{ K}) > 8.1 \text{ Ca}$ (Gottardi and Galli, 1985).

To determine the physical properties and cation exchange of the materials to be used as hydroponic substrates and related with the posterior experiment, the zeolite was ground and sieved, obtaining three particle sizes, which was also carried out with tezontle (expanded volcanic lava), used as control. There were two factors: a) substrates: zeolite and tezontle; b) particle size of substrates: 0.71 to 1.00 (fine), 1.01 to 2.00 (medium) and 2.01 to 3.36 mm (large). In this stage, the design was completely randomized with a 3×2 factorial arrangement, with five replicates.

In the Plant Nutrition Laboratory of the Colegio de Postgraduados, the physical and chemical properties of the samples were determined: apparent density, by the probe method; real density, by the picnometer method; porosity, calculated from

sustratos: 0.71 a 1.00 (fina), 1.01 a 2.00 (media) y 2.01 a 3.36 mm (gruesa). En esta etapa el diseño fue completamente al azar con un arreglo factorial 3×2 , con cinco repeticiones.

En el Laboratorio de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados se determinaron las propiedades físicas y químicas de las muestras: densidad aparente, por el método de la probeta; densidad real, mediante el método del picnómetro; porosidad, calculada a partir de la densidad real y aparente; punto de marchitamiento permanente, por el método del girasol (Coras, 1989); agua a saturación y a capacidad de campo, mediante el método de la columna (Ansorena, 1994); pH y conductividad eléctrica, en el extracto de saturación, medidos con un potenciómetro Conductronic PC18.

La zeolita, en las tres granulometrías se saturó con K^+ , Ca^{2+} o Mg^{2+} durante 5 d con soluciones de KNO_3 2N, $Ca(NO_3)_2$ 2 N o $Mg(NO_3)_2$ 2 N; luego se saturó en cinco ocasiones con agua destilada, y la CE resultó menor que 2 $dS\ m^{-1}$. En la zeolita tratada se determinaron los cationes intercambiables (inclusive de la zeolita) mediante el método del acetato de amonio a pH 7 (Ulrich y Hills, 1967). La cuantificación se hizo con un espectrofotómetro de inducción con plasma acoplada (ICP-AES), marca Varian.

En la evaluación del sustrato se estudiaron dos factores: zeolitas cargadas (K^+ , Ca^{2+} o Mg^{2+}) y granulometrías, tres niveles de zeolitas cargadas: y los tres tamaños de partículas. El diseño experimental fue completamente al azar con nueve tratamientos en un arreglo factorial 3^2 , con 26 repeticiones. La unidad experimental fueron dos plántulas cultivadas en los conos descritos posteriormente. Se usó tezontle como sustrato testigo, el cual se recomienda para cultivos hidropónicos (Steiner, 1968). Según Boertje (1995), el tezontle no tiene capacidad de intercambio catiónico.

El 21 de enero del 2004 se estableció el experimento, en un invernadero con cubierta plástica ubicado en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados. En las cavidades de semilleros de poliespán se colocaron conos de plástico con capacidad para 30 cm^3 de sustrato, donde se establecieron dos plántulas de jitomate cv. Mitsuri. Las plántulas se regaron a las 9:00 y 13:00 h con la solución nutritiva Universal de Steiner (FAO, 1990), con concentraciones de 12, 1, 3.5, 7, 4.5 y 2 $cmol\ L^{-1}$ de NO_3^- , HPO_4^- , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , a potencial osmótico de -72 kPa; las concentraciones de micronutrientes fueron ($mg\ L^{-1}$): 4, 0.865, 1.6, 0.023 y 0.011 de Fe, B, Mn, Zn y Cu. El pH de la solución nutritiva se ajustó a 5.5 con H_2SO_4 1 N. El potencial osmótico de la solución nutritiva se modificó durante el periodo de producción de las plántulas: las primeras dos semanas se regó con solución a -24 kPa; las semanas tercera y cuarta con solución a -48 kPa; y de la semana quinta a la octava con solución a -72 kPa.

De las 26 repeticiones, seis se usaron para medir las variables de rendimiento: número de hojas; altura de plántulas; diámetro de tallo (con un calibrador electrónico); volumen de raíz, por desplazamiento de volumen; peso fresco de hoja, tallo y follaje (hoja+tallo); y peso seco de follaje y raíz, con una balanza Ohaus, con precisión de 0.1 g. En las 20 repeticiones restantes se determinó la concentración de nutrientes en el follaje: se integraron cuatro repeticiones compuestas, cada una, con las plántulas de cinco conos, y se secaron en una estufa con circulación forzada de aire, a 70 °C, hasta

the apparent and real density; permanent wilting point, with the sunflower method (Coras, 1989); water to saturation point and to field capacity, with the column method (Ansorena, 1994); pH and electrical conductivity, in the saturation extract, measured with a Conductronic PC18 potentiometer.

Zeolite, in the three particle sizes, was saturated with K^+ , Ca^{2+} or Mg^{2+} during 5 d with solutions of KNO_3 2N, $Ca(NO_3)_2$ 2N or $Mg(NO_3)_2$ 2N; then was saturated on five occasions with distilled water, and the CE was less than 2 $dS\ m^{-1}$. In the treated zeolite, the exchangeable cations were determined (including those of the zeolite) by means of the ammonium acetate to pH 7 method (Ulrich and Hills, 1967). The quantification was carried out with a Varian induction spectrophotometer with coupled plasma (ICP-AES).

In the evaluation of the substrate, two factors were studied: loaded zeolites (K^+ , Ca^{2+} or Mg^{2+}) and particle sizes, three levels of loaded zeolite: and the three sizes of particles. The experimental design was completely randomized with nine treatments in a 3^2 factorial arrangement, with 26 replicates. The experimental unit consisted of two seedlings planted in the cones that are described below. Tezontle was used as a control substrate, which is recommended for soilless culture (Steiner, 1968). According to Boertje (1995), tezontle does not have cation exchange capacity.

The experiment was established on January 21 of 2004, in a greenhouse with plastic cover in the Montecillo Campus of the Colegio de Postgraduados. In the cavities of the polyspan seed plots, plastic cones with a capacity for 30 cm^3 of substrate were placed, into which two seedlings of tomato cv. Mitsuri were established. The seedlings were irrigated at 9:00 and 13:00 h with the Steiner Universal nutritive solution (FAO, 1990), with concentrations of 12, 1, 3.5, 7, 4.5 and 2 $cmol\ L^{-1}$ of NO_3^- , HPO_4^- , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} , to osmotic potential of -72 kPa; the concentrations of micronutrients were ($mg\ L^{-1}$): 4, 0.865, 1.6, 0.023 and 0.011 of Fe, B, Mn, Zn and Cu. The pH of the nutritive solution was modified during the production period of the seedlings: the first two weeks, irrigations were carried out with solution at -24 kPa; the third and fourth weeks with solution at -48 kPa; and the fifth to eighth weeks with solution at -72 kPa.

Of the 26 replicates, six were used to measure the yield variables: number of leaves; seedling height; stem diameter (with an electron calibrator); root volume, by volume displacement; fresh weight of leaf, stem and foliage (leaf+stem); and dry weight of foliage and root, with an Ohaus scale, with a precision of 0.1 g. In the other 20 replicates, the concentration of nutrients was determined in the foliage; four composed replicates were integrated, each one with the seedlings of five cones, and were dried in an oven with forced air circulation, at 70 °C, until reaching constant weight. Except for N, the nutrients were determined through conventional moist digestion (Alcántar and Sandoval, 1999), were quantified with a Varian induction spectrophotometer with coupled plasma (ICP-AES); the total nitrogen was determined through the microkjeldahl method (Brearen and Mulvaney, 1982).

A variance analysis (SAS, 1988) was made of the characteristics of the substrates and the yield variables, as well as the concentration and extraction of nutrients. The comparison of means of the significant

peso constante. Los nutrientes, excepto N, se determinaron mediante digestión húmeda convencional (Alcántar y Sandoval, 1999), se cuantificaron con un espectrofotómetro de inducción con plasma acoplada (ICP-AES), marca Varian; el nitrógeno total se determinó mediante el método microkjeldahl (Brearen y Mulvaney, 1982).

Se hizo un análisis de varianza (SAS, 1988) de las características de los sustratos y las variables de rendimiento, así como la concentración y extracción de nutrientes. La comparación de medias de las interacciones significativas se hizo mediante la prueba de Scheffé (Martínez, 1996). Se comparó el valor de cada tratamiento testigo con la media general de los tratamientos correspondientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hubo efectos significativos ($p \leq 0.05$) en el Ca^{2+} adsorbido en las zeolitas, a causa de la granulometría y de la solución desplazante (efectos principales); para Mg^{2+} , sólo hubo efecto a causa de la solución desplazante (Cuadro 1). Con la granulometría gruesa, la cantidad de Ca^{2+} fue menor ($p \leq 0.05$); las cantidades de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} adsorbidas fueron función directa del catión en la solución desplazante (Cuadro 1). El K^+ adsorbido y el Na^+ remanente dependieron de la interacción entre la granulometría y la solución desplazante (Cuadro 1); los valores de K^+ dentro de la solución desplazante KNO_3 , obtenidos con granulometría fina fueron mayores ($p \leq 0.05$) que los obtenidos con las granulometrías media y gruesa. En forma concordante, el Na^+ remanente de KNO_3 y granulometría media fue significativamente menor ($p \leq 0.05$) (Cuadro 1). Destaca que la zeolita de granulometría fina favorece el poder desplazante del K^+ de la solución sobre el Na^+ adsorbido en la zeolita. Dentro de las cantidades de K^+ con la granulometría fina, la de la solución desplazada con KNO_3 fue mayor respecto a la de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, en correspondencia, la cantidad de Na^+ fue la menor (Cuadro 1). Los mismos efectos se obtuvieron con las granulometrías media y gruesa (Cuadro 1); aquí destaca el poder desplazante de la solución de KNO_3 . Inclusive el total de cationes adsorbidos debidos a la solución de KNO_3 fue significativamente mayor; le siguió el de $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ y el de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (Cuadro 1). Estos resultados concuerdan con los reportados por Ming y Mumpton (1989).

En adelante se denominará zeolita cargada de K^+ , Ca^{2+} , o Mg^{2+} (Z_K , Z_{Ca} o Z_{Mg}), a la tratada con la solución desplazante correspondiente. En las variables de rendimiento se obtuvieron efectos significativos debidos a la granulometría y la zeolita cargada, así como a la interacción de ambas, excepto en número de hojas (NH), diámetro de tallo (DT) peso seco de follaje (PSF) y peso seco de raíz (PSR), en las que la interacción no fue significativa (Cuadro 2). En DT y

interacciones was performed with the Scheffé test (Martínez, 1996). The value of each control treatment was compared with general mean of the corresponding treatments.

RESULTS AND DISCUSSION

There were significant effects ($p \leq 0.05$) in the Ca^{2+} absorbed in the zeolites, due to the particle sizes and to the displacement solution (principal effects); for Mg^{2+} , there was only effect from the displacement solution (Table 1). With the large particle size, the amount of Ca^{2+} was lower ($p \leq 0.05$); the amounts of K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} absorbed were a direct function of the cation in the displacement solution (Table 1). The absorbed K^+ and the remaining Na^+ depended on the interaction between the particle size and the displacement solution (Table 1); the values of K^+ within the displacement solution KNO_3 , obtained with fine particle size were higher ($p \leq 0.05$) than those obtained with the medium and large particle sizes. In concordance, the remaining Na^+ of KNO_3 and medium particle size was significantly lower ($p \leq 0.05$) (Table 1). It is outstanding that the zeolite of the fine particle size favors the displacement capacity of the K^+ of the solution over the Na^+ absorbed in the zeolite. Within the quantities of K^+ with the fine particle size, that of the solution displaced with KNO_3 was higher with respect to that of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, in correspondence, the amount of Na^+ was the lowest (Table 1). The same effects were obtained with the medium and large particle sizes (Table 1); here the displacement capacity of the KNO_3 solution is outstanding. Even the total of cations absorbed due to the KNO_3 was significantly higher; it was followed by that of $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ and that of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (Table 1). These results concur with those reported by Ming and Mumpton (1989).

From here on, the term zeolite loaded with K^+ , Ca^{2+} or Mg^{2+} (Z_K , Z_{Ca} or Z_{Mg}), will be used to refer to that treated with the corresponding displacement solution. In the yield variables, significant effects were obtained due to the particle size and the loaded zeolite, as well as to the interaction of the two, except in number of leaves (NL), stem diameter (SD), dry weight of foliage (DFW) and dry weight of root (DRW), in which the interaction was not significant (Table 2). In SD and DFW, the highest means were those of fine and medium particle size; in NL, the highest means were obtained in medium particle size, and in DRW, there were no differences from this factor (Table 2). In these variables, the fine and medium particle sizes produced seedlings with higher growth.

Among the means obtained with the loaded zeolite, NL and SD did not present significant differences; in

Cuadro 1. Medias de las variables K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , en relación con los factores granulometría y solución desplazante y su interacción.
Table 1. Means of the variables K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ , in relation to the factors of particle size and displacement solution, and their interaction.

| Factor | | K^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Na^+ | Total |
|---------------------------------------|--------------|---------------------------------------|-----------|-----------|--------|---------|
| | | (cmol _c kg ⁻¹) | | | | |
| Granulometría (G) [†] | | | | | | |
| | Fina | 48.65a [¶] | 6.74ab | 6.36a | 34.15a | 95.91a |
| | Media | 48.14a | 6.93a | 5.92a | 33.69a | 94.69a |
| | Gruesa | 42.57b | 6.65b | 6.08a | 31.36b | 86.68b |
| Solución desplazante(SD) [§] | | | | | | |
| | KNO_3 | 72.10a | 5.19c | 5.08b | 19.59c | 101.97a |
| | $Ca(NO_3)_2$ | 31.60c | 9.44a | 4.83b | 35.46b | 81.34c |
| | $Mg(NO_3)_2$ | 35.65b | 5.69b | 8.45a | 44.17a | 93.98b |
| SD | G | | | | | |
| KNO_3 | Fina | 78.51a [Ⓟ] | 4.99a | 4.86a | 17.88b | 106.24a |
| | Media | 68.98b | 5.48a | 5.01a | 23.30a | 102.77a |
| | Gruesa | 68.82b | 5.09a | 5.36a | 17.60b | 96.88a |
| $Ca(NO_3)_2$ | Fina | 33.77a | 9.47a | 5.04a | 35.10a | 83.39a |
| | Media | 31.48a | 9.47a | 4.69a | 36.95a | 82.60a |
| | Gruesa | 29.56a | 9.37a | 4.75a | 34.33a | 78.02a |
| $Mg(NO_3)_2$ | Fina | 33.68b | 5.75a | 9.17a | 49.48a | 98.09a |
| | Media | 43.95a | 5.84a | 8.05a | 40.85b | 98.70a |
| | Gruesa | 29.34c | 5.48a | 8.15a | 42.18b | 85.14a |
| G | SD | | | | | |
| Fina | KNO_3 | 78.51a | 4.99a | 4.86a | 17.88c | 106.24a |
| | $Ca(NO_3)_2$ | 33.77b | 9.47a | 5.04a | 35.10b | 83.39a |
| | $Mg(NO_3)_2$ | 33.68b | 5.75a | 9.17a | 49.48a | 98.09a |
| Media | KNO_3 | 68.98a | 5.48a | 5.01a | 23.30c | 102.77a |
| | $Ca(NO_3)_2$ | 31.48c | 9.47a | 4.69a | 36.95b | 82.60a |
| | $Mg(NO_3)_2$ | 43.95b | 5.84a | 8.05a | 40.85a | 98.70a |
| Gruesa | KNO_3 | 68.82a | 5.09a | 5.36a | 17.60c | 96.88a |
| | $Ca(NO_3)_2$ | 29.56b | 9.37a | 4.75a | 34.33b | 78.02a |
| | $Mg(NO_3)_2$ | 29.34b | 5.48a | 8.14a | 42.18a | 85.14a |

[†] Granulometría fina: 0.71-1.00; media: 1.01-2.00; gruesa: 2.01-3.36 mm.

[¶] Medias con letras diferentes en una columna, son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$).

[§] Solución desplazante 2N.

[Ⓟ] Medias con letras diferentes en una columna, son estadísticamente diferentes (Scheffé; $p \leq 0.05$).

PSF las medias mayores fueron las de granulometría fina y media; en NH las medias más altas se obtuvieron en granulometría media, y en PSR no hubo diferencias por este factor (Cuadro 2). En estas variables, las granulometrías fina y media produjeron plántulas con mayor crecimiento.

Entre las medias obtenidas con la zeolita cargada, NH y DT no presentaron diferencias significativas; en PSF y PSR las mayores medias fueron las de Z_K y Z_{Mg} (Cuadro 2).

Para la granulometría en Z_K no hubo diferencias significativas en volumen de raíz (VR), peso fresco de hojas (PFH), peso fresco de tallo (PFT), peso fresco de follaje (PFF) y peso fresco de raíz (PFR) (Cuadro

DFW and DRW, the highest means were those of Z_K and Z_{Mg} (Table 2).

For the particle size in Z_K , there were no significant differences in root volume (RV), fresh leaf weight (FLW), fresh stem weight (FSW), fresh foliage weight (FFW) and fresh root weight (FRW) (Table 2). For Z_{Mg} , the particle size had an effect on seedling height (SH), FLW, FSW, and FFW; the means in fine and medium particle size were higher than those of large particle size; for the variables RV and FRW, the means were not different (Table 2). Within Z_{Ca} , particle size did not have an effect on FLW and FSW, but in SH, RV, FFW and FRW, the highest values were obtained with the medium

Cuadro 2. Comparación de medias de variables de rendimiento[†] de plántulas de jitomate, en relación con los factores granulometría y zeolita cargada y su interacción.

Table 2. Comparison of means of yield variables of tomato seedlings, in relation to the factors of particle size and loaded zeolite, and their interaction.

| Factor | NH [†] | AP (cm) | DT (mm) | VR (cm ³) | PFH | PFT | PFF | PFR | PSF | PSR | |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------|
| | | | | | | | | | | | (g plántula ⁻¹) |
| Granulometría (G) [‡] | | | | | | | | | | | |
| Fina | 4.86b [§] | 7.4a | 2.71a | 1.03c | 1.59a | 0.42a | 2.98b | 1.05c | 0.16a | 0.10a | |
| Media | 5.53a | 7.5a | 2.68a | 1.65a | 1.74a | 0.46a | 3.20a | 1.63a | 0.16a | 0.12a | |
| Gruesa | 4.80b | 5.8b | 2.47b | 1.39b | 1.20b | 0.33b | 2.62c | 1.34b | 0.11b | 0.10a | |
| Zeolita cargada (Z) [¶] | | | | | | | | | | | |
| Z _K | 5.19a | 7.0a | 2.64a | 1.64a | 1.61a | 0.43a | 3.04a | 1.62a | 0.16a | 0.12a | |
| Z _{Ca} | 4.89a | 6.6a | 2.53a | 1.13b | 1.33b | 0.34b | 2.76b | 1.13b | 0.13b | 0.09b | |
| Z _{Mg} | 5.11a | 7.1a | 2.68a | 1.30b | 1.59a | 0.43a | 3.00a | 1.28b | 0.14ab | 0.10ab | |
| Z | G | | | | | | | | | | |
| Z _k | Fina | 4.83a [□] | 7.78a | 2.70a | 1.36a | 1.66a | 0.42a | 3.10a | 1.41a | 0.156a | 0.10a |
| | Media | 5.75a | 7.25a | 2.63a | 1.73a | 1.76a | 0.46a | 3.23a | 1.73a | 0.175a | 0.13a |
| | Gruesa | 5.00a | 5.95b | 2.60a | 1.83a | 1.40a | 0.40a | 2.78a | 1.71a | 0.138a | 0.12a |
| Z _{Ca} | Fina | 4.58a | 6.20b | 2.51a | 0.60b | 1.13a | 0.30a | 2.53b | 0.58b | 0.129a | 0.07a |
| | Media | 5.41a | 7.58a | 2.63a | 1.68a | 1.73a | 0.42a | 3.18a | 1.65a | 0.146a | 0.11a |
| | Gruesa | 4.66a | 5.93c | 2.45a | 1.10ab | 1.11a | 0.30a | 2.56c | 1.16a | 0.102a | 0.07a |
| Z _{Mg} | Fina | 5.16a | 8.20a | 2.92a | 1.13a | 1.96a | 0.54a | 3.30a | 1.16a | 0.185a | 0.11a |
| | Media | 5.41a | 7.62a | 2.76a | 1.53a | 1.73a | 0.47a | 3.20a | 1.51a | 0.146a | 0.10a |
| | Gruesa | 4.75a | 5.65b | 2.36a | 1.23a | 1.08b | 0.28b | 2.51b | 1.15a | 0.100a | 0.09a |
| G | Z | | | | | | | | | | |
| Fina | Z _k | 4.83a | 7.78ab | 2.70a | 1.36a | 1.66ab | 0.42ab | 3.10ab | 1.41a | 0.156a | 0.10a |
| | Z _{Ca} | 4.58a | 6.20b | 2.51a | 0.60b | 1.13b | 0.30b | 2.53b | 0.58b | 0.129a | 0.07a |
| | Z _{Mg} | 5.16a | 8.20a | 2.92a | 1.13ab | 1.96a | 0.54a | 3.30a | 1.16ab | 0.185a | 0.11a |
| Media | Z _k | 5.75a | 7.25a | 2.63a | 1.73a | 1.76a | 0.46a | 3.23a | 1.73a | 0.175a | 0.13a |
| | Z _{Ca} | 5.41a | 7.58a | 2.63a | 1.68a | 1.73a | 0.42a | 3.18a | 1.65a | 0.146a | 0.11a |
| | Z _{Mg} | 5.41a | 7.62a | 2.76a | 1.53a | 1.73a | 0.47a | 3.20a | 1.51a | 0.146a | 0.10a |
| Gruesa | Z _k | 5.00a | 5.95a | 2.60a | 1.83a | 1.40a | 0.40a | 2.78a | 1.71a | 0.138a | 0.12a |
| | Z _{Ca} | 4.66a | 5.93a | 2.45a | 1.10a | 1.11a | 0.30a | 2.56a | 1.16a | 0.102a | 0.07a |
| | Z _{Mg} | 4.75a | 5.65a | 2.46a | 1.23a | 1.08a | 0.28a | 2.51a | 1.15a | 0.100a | 0.09a |

[†] Número de hojas (NH), altura de plántula (AP), diámetro de tallo (DT), volumen de raíz (VR), peso fresco de hojas (PFH), peso fresco de tallo (PFT), peso fresco de follaje (PFF), peso fresco de raíz (PFR), peso seco de follaje (PSF) y peso seco de raíz (PSR).

[‡] Granulometría fina: 0.71-1.00, media: 1.01-2.00, gruesa: 2.01-3.36 mm.

[§] Medias con letras diferentes para cada variable son estadísticamente diferentes (Tukey; p ≤ 0.05).

[¶] Zeolita cargada con K⁺ Ca²⁺ o Mg²⁺.

[□] Medias con letras diferentes para cada variable son estadísticamente diferentes (Tukey; p ≤ 0.05).

2). Para Z_{Mg}, la granulometría tuvo efecto en AP, PFH, PFT, y PFF; las medias en granulometría fina y media fueron mayores que aquellas de granulometría gruesa; para las variables VR y PFR, las medias no fueron diferentes (Cuadro 2). Dentro de Z_{Ca} la granulometría no tuvo efecto en PFH y PFT, pero en AP, VR, PFF y PFR los valores mayores se obtuvieron con la granulometría media; las medias de Z_{Ca} fueron las más pequeñas (Cuadro 2). De lo anterior se infiere que las plántulas de jitomate de mayor tamaño fueron las que absorbieron K⁺ o Mg²⁺ de las zeolitas correspondientes.

particle size; the means of Z_{Ca} were the smallest (Table 2). From the above, it is inferred that the tomato seedlings of the largest size were those that absorbed K⁺ or Mg²⁺ from the corresponding zeolites.

For the type of load within the zeolite of fine particle size, there was a significant effect for PA, RV, FLW, FSW, FFW, and FRW; the highest values were those of Z_K and Z_{Mg}. With the medium and large particle sizes, no significant effects were detected of the load type on the yield variables. Lara *et al.* (1997) found that tomato seedlings treated with the Steiner solution,

Para el tipo de carga dentro de la zeolita de granulometría fina hubo efecto significativo para AP, VR, PFH, PFT, PFF, y PFR; los valores mayores fueron los de Z_K , y Z_{Mg} . Con las granulometrías media y gruesa no se detectaron efectos significativos del tipo de carga sobre las variables de rendimiento. Lara *et al.* (1997) encontraron que plántulas de jitomate tratadas con la solución Steiner, enriquecida con NO_3^- o K^+ , absorbieron mayormente dichos nutrimentos; además, lo hicieron en forma secuenciada NO_3^- y K^+ . La adsorción menor de Mg^{2+} de la Z_{Mg} gruesa se debió a su menor superficie relativa (Ames, 1961). Hasta aquí, el rendimiento de las plántulas cultivadas en Z_K , o Z_{Mg} fue similar; sin embargo, dado que la zeolita podría ser cargada con ambos nutrimentos (Markovic *et al.*, 1997; Chen y Gabelman, 2000), era de esperarse un resultado aditivo de éstos.

La zeolita cargada con K^+ (Z_K) produjo plántulas con mayor concentración y extracción de K y mínima concentración y extracción de Ca, en y por el follaje (tallo+hoja), con respecto a las cultivadas en las zeolitas cargadas con Ca^{2+} o Mg^{2+} (Z_{Ca} o Z_{Mg}) (Cuadro 3). Se infiere que las raíces tuvieron una demanda de K que pudo ser satisfecha en mayor grado a partir de la zeolita cargada con K^+ , lo que coincide con lo indicado por Chen y Gabelman (2000). Con la zeolita cargada de Mg^{2+} se obtuvieron plántulas con mayor concentración y extracción de Mg que en aquellas cultivadas en las zeolitas cargadas con K^+ o Ca^{2+} (Cuadro 3). La concentración y extracción de N, Zn, y B no fueron afectadas por el tipo de carga en la zeolita. La concentración de P en Z_K fue mayor que en Z_{Mg} ; sin embargo, la extracción de este elemento no fue estadísticamente diferente entre los tres tipos de zeolita.

En la Z_K se obtuvieron plántulas con la menor concentración y extracción de Na (Cuadro 3), lo cual se debió a que el K^+ de la solución desplazante (KNO_3) extrajo más Na^+ de la zeolita natural, con relación a las correspondientes soluciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} (Cuadro 1).

Las plántulas desarrolladas en zeolita de granulometría media presentaron la mayor concentración de Mg y la mayor extracción de Mg, Zn y B. Las plántulas cultivadas en zeolita gruesa tuvieron las mayores concentraciones de P, Ca, Fe, Zn y B y la menor extracción de Na. Las plántulas desarrolladas en granulometría fina tuvieron la mínima extracción y concentración de Ca, Fe, Mn, Zn y B (Cuadro 3).

Al comparar tezoncles, el de granulometría gruesa (TG) generó las menores medias de las variables de rendimiento, excepto NH y PFR (Cuadro 4). Este resultado se debió a que este tratamiento presentó el mayor volumen de agua a saturación, lo que limitó la oxigenación requerida por la raíz de las plántulas

enriched with NO_3^- or K^+ , had higher absorption of these nutrients; furthermore, they absorbed NO_3^- and K^+ sequentially. The lower absorption of Mg^{2+} with respect to that of the large particle Z_{Mg} was due to its smaller relative surface (Ames, 1961). Up to this point, the yield of the seedlings cultivated in Z_K or Z_{Mg} was similar; however, given that the zeolite could be loaded with both nutrients (Markovic *et al.*, 1997; Chen and Gabelman, 2000), an additive result was to be expected of them.

The zeolite loaded with K^+ (Z_K) produced seedlings with higher concentration and extraction of K and minimum concentration and extraction of Ca, in and through the foliage (stem+leaf), with respect to those cultivated in the zeolite loaded with Ca^{2+} or Mg^{2+} (Z_{Ca} or Z_{Mg}) (Table 3). It is inferred that the roots had a demand of K that could be satisfied to a higher degree from the zeolite loaded with K^+ , which coincides with what was indicated by Chen and Gabelman (2000). With the zeolite loaded with Mg^{2+} , seedlings with higher concentration and extraction of Mg were obtained than in those cultivated in the zeolites loaded with K^+ or Ca^{2+} (Table 3). The concentration and extraction of N, Zn and B were not affected by the type of load in the zeolite. The concentration of P in Z_K was higher than in Z_{Mg} ; however, the extraction of this element was not statistically different among the three types of zeolite.

In the Z_K , plants with the lowest concentration and extraction of Na were obtained (Table 3), which was due to the fact that the K^+ of the displacement solution (KNO_3) extracted more Na^+ from the natural zeolite, with respect to the corresponding solutions of Ca^{2+} and Mg^{2+} (Table 1).

The seedlings developed in zeolite in medium size particles presented the highest concentration of Mg and the highest extraction of Mg, Zn and B. The seedlings cultivated in large particle zeolite had the highest concentrations of P, Ca, Fe, Zn and B and the lowest extraction of Na. The seedlings developed in fine particle size had the lowest extraction and concentration of Ca, Fe, Mn, Zn and B (Table 3).

When the tezoncles were compared, that of large particle size (LP) generated the smallest means of the yield variables, with the exception of NL and FRW (Table 4). This result was due to the fact that this treatment presented the highest volume of water to saturation, which limited the oxygenation required by the root of the seedlings (Table 5) (Tilt *et al.*, 1987; Gislerød *et al.*, 1997; Caron *et al.*, 2001).

In the control treatments (FS, MS and GS), seedlings were produced with concentrations, in the foliage, higher in Ca^{2+} and lower in Na^{2+} with respect to the mean (Table 4). Thus, the zeolites

Cuadro 3. Concentración y extracción de nutrimentos en y por el follaje (hoja+tallo) de plántulas de jitomate, en relación con los factores granulometría y zeolita cargada y su interacción.**Table 3. Concentration and extraction of nutrients in and through the foliage (leaf+stem) of tomato seedlings, in relation to the factors of particle size and loaded zeolite, and their interaction.**

| Factor | Concentración en follaje | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------------------|-------|--------|-------|--------|------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| | N | P | K | Ca | Mg | Na | Fe | Mn | Zn | B |
| | (g kg ⁻¹) | | | | | (mg kg ⁻¹) | | | | |
| Granulometría (G) [†] | | | | | | | | | | |
| fina | 40.8a [¶] | 8.6b | 12.8a | 10.3c | 11.7b | 4.4a | 780c | 443b | 159c | 213c |
| media | 41.4a | 9.5b | 10.9b | 14.5b | 13.3a | 3.9b | 970b | 671a | 181b | 271b |
| gruesa | 43.2a | 10.9a | 11.9ab | 16.7a | 12.8ab | 3.9b | 1148a | 711a | 200a | 302a |
| Zeolita cargada (Z) [§] | | | | | | | | | | |
| Z _K | 42.9a | 10.3a | 14.5a | 10.4b | 9.8c | 2.1b | 1034a | 651a | 186a | 274a |
| Z _{Ca} | 41.5a | 9.5ab | 10.8b | 14.9a | 12.9b | 5.0a | 1076a | 644a | 170a | 254a |
| Z _{Mg} | 41.0a | 9.2b | 10.4b | 16.2a | 15.0a | 5.1a | 806b | 529b | 185a | 258a |
| G×Z | ns ^p | ns | ns | ns | ** | ** | ** | ** | * | * |
| Factor | Extracción por follaje | | | | | | | | | |
| | N | P | K | Ca | Mg | Na | Fe | Mn | Zn | B |
| | (mg plántula ⁻¹) | | | | | (µg plántula ⁻¹) | | | | |
| Granulometría (G) | | | | | | | | | | |
| Fina | 6.1a | 1.3b | 1.8a | 1.6b | 1.8ab | 0.68a | 1.14b | 0.63c | 0.24b | 0.31b |
| media | 7.4a | 1.7a | 2.0a | 2.6a | 2.3a | 0.71a | 1.75a | 1.21a | 0.33a | 0.48a |
| gruesa | 5.8a | 1.5ab | 1.6a | 2.2a | 1.7b | 0.51b | 1.55a | 0.95b | 0.27ab | 0.40ab |
| Zeolita cargada (Z) [§] | | | | | | | | | | |
| Z _K | 6.7a | 1.6a | 2.2a | 1.6b | 1.5b | 0.32b | 1.6a | 1.0a | 0.29a | 0.43a |
| Z _{Ca} | 6.1a | 1.4a | 1.5b | 2.2a | 1.8b | 0.71a | 1.6a | 1.0ab | 0.25a | 0.38a |
| Z _{Mg} | 6.5a | 1.5a | 1.7b | 2.6a | 2.5a | 0.86a | 1.2b | 0.8b | 0.30a | 0.40a |
| G×Z | ns ^p | ns | ns | ns | * | * | * | ns | ns | ns |

[†] Granulometría fina: 0.71-1.00; media: 1.01-2.00; gruesa: 2.01-3.36 mm.

[¶] Medias con letras diferentes para cada variable son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$).

[§] Zeolita cargada con K⁺, Ca²⁺ o Mg²⁺.

^p ns, * y **: no significativo ($p > 0.05$), significativo y altamente significativo (Tukey; $p \leq 0.01$).

(Cuadro 5) (Tilt *et al.*, 1987; Gislerød *et al.*, 1997; Caron *et al.*, 2001).

En los tratamientos testigo (TF, TM y TG) se produjeron plántulas con concentraciones, en el follaje, mayores de Ca²⁺ y menores de Na⁺ con respecto a la media (Cuadro 4). Entonces, las zeolitas cargadas con K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ no aportaron el Ca²⁺ requerido por las plántulas, a pesar de estar presente en todas ellas (Cuadro 1). Además, la solución nutritiva utilizada, sin Na, produjo plántulas con baja concentración de Na; mientras que las plantas nutridas con la misma solución pero que crecieron en las zeolitas cargadas con K⁺, Ca²⁺ o Mg²⁺, absorbieron Na⁺ en cantidades importantes y proveniente de la zeolita natural, mismo que no fue totalmente desalojado por las soluciones desplazantes. Se infiere que hubo respuesta favorable de las plantas al Na⁺ y que su absorción disminuyó la de Ca²⁺ por antagonismo entre cationes.

loaded with K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ did not supply the Ca²⁺ required by the seedlings, in spite of being present in all of them (Table 1). In addition, the nutritive solution used, without Na, produced seedlings with low concentration of Na, whereas the plants fed with the same solution but which were grown in the zeolites loaded with K⁺, Ca²⁺ or Mg²⁺, absorbed Na⁺ in important quantities and from the natural zeolite, which was not totally eliminated by the displacement solutions. It is inferred that there was favorable response of the plants to the Na⁺ and that its absorption diminished that of Ca²⁺ due to antagonism among cations.

The concentrations of N, P, K and Mg in the seedlings from the control treatments, were similar to the corresponding means (Table 4). These results were due to the adequate chemical composition of the nutritive solution used (FAO, 1990).

Cuadro 4. Comparación entre la media factorial de zeolitas (F) y los testigos (T), de las variables de rendimiento, concentración y extracción de nutrimentos de plántulas de jitomate.

Table 4. Comparison between the factorial mean of zeolites (F) and the controls (T), of the variables of yield, concentration and extraction of nutrients of tomato seedlings.

| Media | Variables de rendimiento | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------|------------|------------|--------------------------|------|-------|-----------------------------|------|-------|-------|
| | NH [†] | AP (cm) | DT (mm) | VR (cm ³) | PFH | PFT | (g plántula ⁻¹) | | | |
| | | | | | | | PFF | PFR | PSF | PSR |
| F | 5.1a [¶] | 6.9a | 2.6a | 1.4a | 1.5a | 0.40b | 2.9a | 1.3a | 0.14a | 0.10a |
| TF [§] | 5.0a | 8.1a | 2.7a | 1.2a | 1.9a | 0.60a | 3.2a | 1.2a | 0.17a | 0.09a |
| F | 5.1a | 6.9a | 2.6a | 1.4a | 1.5a | 0.40a | 2.9a | 1.3a | 0.14a | 0.10a |
| TM ^b | 5.0a | 6.5a | 2.5a | 1.1a | 1.6a | 0.45a | 2.9a | 1.1a | 0.14a | 0.09a |
| F | 5.1a | 6.9a | 2.6a | 1.4a | 1.5a | 0.40a | 2.9a | 1.3a | 0.14a | 0.10a |
| TG [□] | 4.0a | 4.9b | 2.0b | 0.7b | 0.9b | 0.24b | 2.2b | 0.7a | 0.08b | 0.06b |

| Media | Concentración en follaje | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|------|------|------|
| | N | P | K | Ca | Mg | Na | (mg kg ⁻¹) | | | |
| | | | | | | | Fe | Mn | Zn | B |
| F | 41.8a | 9.7a | 11.9a | 13.8b | 12.6a | 4.1a | 973a | 608a | 181a | 262a |
| TF [§] | 36.4a | 9.5a | 13.4a | 23.7a | 13.1a | 0.94b | 1057a | 246b | 164a | 288a |
| F | 41.8a | 9.7a | 11.9a | 13.8b | 12.6a | 4.1a | 973a | 608a | 181a | 262a |
| TM ^b | 35.8a | 10.7a | 13.0a | 23.7a | 12.5a | 0.97b | 1040a | 360b | 166a | 302a |
| F | 41.8a | 9.7a | 11.9a | 13.8b | 12.6a | 4.1a | 973a | 608a | 181a | 262a |
| TG [□] | 41.7a | 11.2a | 12.9a | 23.6a | 13.5a | 1.2b | 1250a | 429b | 174a | 363b |

| Media | Extracción por follaje | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|------|------|------|------|-------|------------------------------|-------|-------------------|-------|
| | N | P | K | Ca | Mg | Na | (μg plántula ⁻¹) | | | |
| | | | | | | | Fe | Mn | Zn | B |
| F | 6.5a | 1.5a | 1.8a | 2.1b | 2.0a | 0.63a | 1.5a | 0.94a | 0.28a | 0.40a |
| TF [§] | 6.9a | 1.8a | 2.6a | 4.5a | 2.5a | 0.18b | 2.0a | 0.47a | 0.31a | 0.56a |
| F | 6.5a | 1.5a | 1.8a | 2.1a | 2.0a | 0.63a | 1.5a | 0.94a | 0.28a | 0.40a |
| TM ^b | 4.9a | 1.4a | 1.8a | 3.2a | 1.7a | 0.13b | 1.4a | 0.49a | 0.23a | 0.41a |
| F | 6.5a | 1.5a | 1.8a | 2.1a | 2.0a | 0.63a | 1.5a | 0.94a | 0.28a | 0.40a |
| TG [□] | 3.5a | 1.0a | 1.1a | 2.0a | 1.1a | 0.10b | 1.1a | 0.37b | 0.15 ^a | 0.31a |

[†] Número de hojas (NH), altura de plántula (AP), diámetro de tallo (DT), volumen de raíz (VR), peso fresco de hojas (PFH), peso fresco de tallo (PFT), peso fresco de follaje (PFF), peso fresco de raíz (PFR), peso seco de follaje (PSF) y peso seco de raíz (PSR).

[¶] Medias con letras diferentes para cada variable son estadísticamente diferentes (Scheffé; p ≤ 0.05).

[§] TF, tezontle con granulometría fina, 0.71 a 1.00 mm.

^b TM, tezontle con granulometría media, 1.01 a 2.00 mm.

[□] TG, tezontle con granulometría gruesa, 2.01 a 3.36 mm.

Las concentraciones de N, P, K y Mg en las plántulas provenientes de los tratamientos testigo, fueron similares a las medias correspondientes (Cuadro 4). Estos resultados se debieron a la adecuada composición química de la solución nutritiva utilizada (FAO, 1990).

CONCLUSIONES

El K de la solución desplazante (KNO₃) fue el catión más eficiente para desplazar al Na de los sitios de intercambio de la zeolita natural. En las zeolitas con granulometría fina (0.74-1.00) y media (1.01 y 2.00

CONCLUSIONS

The K of the displacement solution (KNO₃) was the most efficient cation for displacing the Na from the exchange sites of the natural zeolite. In the zeolites with fine (0.74-1.00) and medium (1.01 and 2.00 mm) particle sizes, seedlings of a larger size were obtained than in those of large particle size. With the zeolites loaded with K⁺ or Mg²⁺, plants similar to each other in size were produced, but larger than those obtained with zeolite loaded with Ca²⁺. The seedlings that were grown in the zeolites showed higher concentrations of Na⁺, but lower concentrations of Ca²⁺, with respect to

Cuadro 5. Medias de las propiedades físicas y químicas, en relación con la naturaleza del sustrato y la granulometría y su interacción.**Table 5. Means of the physical and chemical properties, in relation with the nature of the substrate and the particle size, and their interaction.**

| Factor | | Da [†] (g cm ⁻³) | Dr (g cm ⁻³) | Sat | CC | PMP | Poros | pH [‡] | CE [‡] (dS m ⁻¹) | |
|--------------------------------|----------|--|-----------------------------|--------|--------|-------|--------|-----------------|--|--|
| | | (%) | | | | | | | | |
| Sustrato (S) | | | | | | | | | | |
| Zeolita | | 0.74b [§] | 2.18b | 59.33b | 24.81a | 2.58a | 66.07b | 5.65b | 0.24a | |
| Tezontle | | 0.82a | 2.70a | 62.88a | 11.90b | 1.97a | 69.38a | 7.98a | 0.06b | |
| Granulometría (G) ^p | | | | | | | | | | |
| Fina | | 0.82a | 2.47a | 56.28c | 18.98a | 3.33a | 66.99b | 6.80a | 0.14b | |
| Media | | 0.79b | 2.43a | 61.35b | 17.34b | 1.93b | 67.40b | 6.87a | 0.14b | |
| Gruesa | | 0.74c | 2.39b | 65.68a | 18.75a | 1.58b | 68.78a | 6.78a | 0.18a | |
| G | S | | | | | | | | | |
| Fina | Zeolita | 0.75b [□] | 2.20a | 56.0a | 26.5a | 4.4a | 66.11b | 5.60a | 0.20a | |
| | Tezontle | 0.88a | 2.75a | 56.6a | 11.4b | 2.3b | 67.87a | 7.99a | 0.08b | |
| Media | Zeolita | 0.75b | 2.18a | 60.0a | 22.8a | 1.8a | 65.55b | 5.70a | 0.23a | |
| | Tezontle | 0.83a | 2.69a | 62.7a | 11.9b | 2.0a | 69.26a | 8.04a | 0.05b | |
| Gruesa | Zeolita | 0.72b | 2.16a | 62.0b | 25.1a | 1.6a | 66.56b | 5.65a | 0.30a | |
| | Tezontle | 0.76a | 2.63a | 69.4a | 12.4b | 1.6a | 71.02a | 7.91a | 0.05b | |
| S | G | | | | | | | | | |
| Zeolita | Fina | 0.75a | 2.20a | 56.0b | 26.5a | 4.4a | 66.11a | 5.60a | 0.20c | |
| | Media | 0.75a | 2.18a | 60.0a | 22.8b | 1.8b | 65.55a | 5.70a | 0.23b | |
| | Gruesa | 0.72b | 2.16a | 62.0a | 25.1a | 1.6b | 66.56a | 5.65a | 0.30a | |
| Tezontle | Fina | 0.88a | 2.75a | 56.6c | 11.4a | 2.3a | 67.87b | 7.99a | 0.08a | |
| | Media | 0.83b | 2.69a | 62.7b | 11.9a | 2.0a | 69.26b | 8.04a | 0.05b | |
| | Gruesa | 0.76c | 2.63a | 69.3a | 12.4a | 1.6a | 71.02a | 7.91a | 0.05b | |

[†] Densidad aparente y real (Da y Dr), saturación (Sat), capacidad de campo (CC), punto de marchitamiento permanente (PMP).

[‡] El sustrato se saturó con agua para medir pH y conductividad eléctrica (CE).

[§] Medias con letras diferentes para cada variable son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$).

^p Granulometría fina: 0.71-1.00, media: 1.01-2.00 y gruesa: 2.01-3.36 mm.

[□] Medias con letras diferentes para cada variable son estadísticamente diferentes (Scheffé; $p \leq 0.05$).

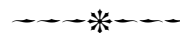
mm) se obtuvieron plántulas de mayor tamaño que en las de granulometría gruesa. Con las zeolitas cargadas con K^+ o Mg^{2+} se produjeron plántulas de tamaño similar entre sí, pero superiores a las obtenidas con zeolita cargada con Ca^{2+} . Las plántulas que crecieron en las zeolitas mostraron mayores concentraciones de Na^+ , pero menores de Ca^{2+} , con relación a las establecidas en tezontle. Las plántulas cultivadas en los tezontles de granulometrías fina y media tuvieron tamaños similares a la media de las cultivadas en zeolitas; las plántulas establecidas en el tezontle de granulometría gruesa fueron de menor tamaño, con respecto a dicha media.

LITERATURA CITADA

Alcántar G., G., y M. Sandoval V. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México. 156 p.

those that were established in tezontle. The seedlings cultivated in the tezontles of fine and medium sized particles had sizes similar to the mean of those cultivated in zeolite; the seedlings established in the tezontle of large particles were smaller, with respect to this mean.

—End of the English version—



Ames Jr., L. L. 1961. Cation sieve properties of the open zeolites chabazite, modernite, erionite and clinoptilolite. The American Mineralogist 45: 689-700.

Ansorena M., J. 1994. Sustratos: Propiedades y Caracterización. Mundi Prensa. Madrid, España. 172 p.

Biran, I., and A. Eliassaf. 1980. The effect of container and aeration conditions on growth of roots and canopy of woody plants. Scientia Horticulturae 12: 385-394.

Boertje, G. A. 1995. Chemical and physical characteristics of pumice growing medium. Acta Horticulturae 401: 85-87.

- Bosch, P., e I. Schifter. 1988. La Zeolita una Piedra que Hierve. La Ciencia desde México. Fondo de Cultura Económica. México D. F. 82 p.
- Brearen, L., and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. *In*: Page, A. L., R. H. Miller, y D. R. Keeney (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy 9.* 2nd edition. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI. USA. pp: 595-634.
- Caron, J., P. Morel, and L. M. Rvière. 2001. Aeration in growing containing large particle size. *Acta Horticulturae* 548: 229-234.
- Coras, M. P. M. 1989. Propiedades Físicas del Suelo Relacionadas con el Riego. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 250 p.
- Chen, J., and W. H. Gabelman. 2000. Morphological and physiological characteristics of tomato roots associated with potassium-adquisition efficiency. *Scientia Horticulturae* 83: 213-225.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1990. *Soilless Culture for Horticultural Crop Production.* Rome, Italy. 188 p.
- Gislerød, H. R. 1997. Effect of aeration on rooting and growth of roses. *Acta Horticulturae* 450: 113-122.
- Gottardi, G., and E. Galli. 1985. Natural zeolites. *In*: Wyllie, P. J. (ed). *Minerals and Rocks.* Springer Verlag. NY. USA. pp: 1-285.
- Lara, A., G. A. Baca, J. L. Tirado, J. D. Etchevers, J. Kohashi-Shibata, and A. Martínez. 1997. Nutrient solutions in two stages of development of tomato plants. *Acta Horticulturae* 481: 273-280.
- Luque, A. 1981. Physical and physicalchemical properties of the volcanic materials used in hydroponics. *Acta Horticulturae* 126: 51-57.
- Martínez G., A. 1996. *Diseños Experimentales. Métodos y Elementos de Teoría.* Ed. Trillas. México. 756 p.
- Markovic, V., M. Djurovka, and Z. Llin. 1997. The effect of seedling quality on tomato yield, plant and fruits characteristics. *Acta Horticulturae* 462: 163-169.
- Ming, D. W., and F. A. Mumpton. 1989. Zeolites in soils. *In*: Dixon, J. B. and S. B. Weed (eds). *Minerals in Soil Environments.* 2nd ed. Soil Sci. Soc. Amer., Madison, WI. USA. pp: 873-911.
- Nus, J. L., and S. E. Brauen. 1991. Clinoptilolitic zeolite as an amendment for establishment of creeping bentgrass on sandy media. *HortScience* 26: 117-119.
- Ostroumov, M.F., H. Ortiz, y Ch. P. Corona. 2005. Zeolitas de México: Diversidad mineralógica y aplicaciones. <http://smm.iim.umich.mx/zeolitas.htm>. Fecha de consulta: Noviembre, 2005.
- Pavlovic, R., S. Petrović, and D. Stevanović. 1998. The influence of transplants quality on the yield of tomato grown in plastic house. *Acta Horticulturae* 456: 81-86.
- Qian, Y. L., A. J. Koski, and R. Welton. 2001. Amending sand with isolite and zeolite under saline conditions: leachate composition and salt deposition. *HortScience* 36: 717-720.
- SAS Institute. 1988. *SAS/STAT user's guide.* Release 6.03 ed. SAS Institute. Cary, NC. USA. 1028 p.
- Stamatakis, M. G., N. Koukouzas, Ch. Vassilatos, E. Kamenou, and K. Samantouros. 2001. The zeolites from Evros Region, Northern Greece: A potential use as cultivation substrate in hydroponics. *Acta Horticulturae* 548: 93-103.
- Steiner, A. A. 1968. Soilless culture. *Proceedings of the 6th Colloquium of the International Potash Institute.* Florence, Italy. pp: 325-341.
- Steiner, A. A. 1976. The development of soilless culture and an introduction to the Congress. *Proceedings Fourth International Congress on Soilless Culture.* Las Palmas, España. pp: 21-37.
- Tilt, K. M., T. E. Bilderback, and W. C. Fonteno. 1987. Particle size and container size effects on growth of three ornamental species. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 112(6):981-984.
- Ulrich, A., and F. J. Hills. 1967. Principles and practices of plant analysis. *In*: *Soil Test and Plant Analysis. Part II. Special Publication 2.* Soil Science Society of America. Madison, WI. USA. pp: 11-24.