

## Dinámica de la composición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México\*

### Dynamics of soil solution composition in crops from western Mexico

Willian Alfredo Narváez-Ortiz<sup>1</sup>, América Berenice Morales-Díaz<sup>2</sup>, Adalberto Benavides-Mendoza<sup>1</sup> y Manuel Humberto Reyes-Valdés<sup>3§</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro- Departamento de Horticultura y <sup>3</sup>Departamento de Fitomejoramiento Calzada Antonio Narro 1923, C. P. 25315. Saltillo, Coahuila, México. <sup>2</sup>Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Instituto Politécnico Nacional-Robótica y Manufactura Avanzada, Unidad Saltillo, Avenida Industria Metalúrgica 1062, C. P. 25900, Parque Industrial, Ramos Arizpe, Coahuila. (williamnarvaezo@hotmail.com; america.morales@cinvestav.edu.mx; abenmen@gmail.com). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: mathgenome@gmail.com.

#### Resumen

El presente estudio es un acercamiento preliminar y descriptivo al fenómeno del comportamiento dinámico de la solución del suelo. El objetivo del trabajo fue el estudio de la composición de la solución del suelo a través del tiempo, para ayudar al entendimiento de la disponibilidad de los diferentes iones, así como su comportamiento individual y colectivo mediante análisis de correlación y de componentes principales (ACP). El trabajo consistió en realizar colectas de información mediante muestreos repetitivos de la solución en diferentes tipos de suelo en zonas de producción intensiva ubicadas en el occidente de México (Jalisco y Colima) para cinco cultivos (aguacate, arándano, fresa, papaya y pimiento). Las muestras de solución del suelo fueron recolectadas en intervalos de 15 días a través de todo el ciclo fenológico para los diferentes cultivos; a las muestras se les determinó el contenido de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), pH y conductividad eléctrica (CE). Los resultados de las correlaciones mostraron patrones similares con un comportamiento decreciente entre los diferentes iones *versus* el tiempo. Los vectores de carga obtenidos mediante el método del ACP mostraron similitud en su comportamiento en todos los cultivos a excepción del cultivo de fresa, no obstante la dinámica del componente

#### Abstract

The present study is a preliminary and descriptive approach to the phenomenon of the dynamic behavior of soil solution. The objective was to study the composition of the soil solution over time, to help the understanding of the availability of different ions, as well as their individual and collective behavior through correlation and principal component analysis (PCA). The work consisted in gathering information by repetitive sampling of the solution in different soil types under intensive production areas located in western Mexico (Jalisco and Colima) for five crops (avocado, cranberry, strawberry, papaya and pepper). The soil solution samples were collected every 15 days throughout the phenological cycle for the different crops; the samples were analyzed for nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ) levels, pH and electrical conductivity (EC). The results of the correlations showed similar patterns with a decreasing behavior among different ions *versus* time. Loading vectors obtained by PCA showed similarity in their behavior in all crops except strawberry; however the dynamics from the principal component for all crops was similar showing concomitant variation over time with an ascending trend. This result indicates the feasibility to model in multivariate ways the dynamic behavior of the soil solution.

\* Recibido: septiembre de 2015  
Aceptado: diciembre de 2015

principal para todos los cultivos fue similar mostrando variación concomitante a través del tiempo con una clara tendencia ascendente. Este resultado indica la factibilidad de modelar de forma multivariada el comportamiento dinámico de la solución del suelo.

**Palabras clave:** componente principal, dinámica nutrimental, solución del suelo.

## Introducción

El suelo es un cuerpo natural y un sistema complejo abierto desde el punto de vista de los flujos de energía y materia. Es el resultado de varios factores de formación, como son el tiempo, el material parental, el clima, la vegetación, los organismos y la topografía, integrados en un sistema con múltiples interacciones. Por tal razón el suelo no debiera conceptualizarse como un sistema estático sino como un sistema complejo y dinámico (Jenny, 1994) que para estudiarlo, lo fragmentamos en sus componentes ubicándolos en los ámbitos físico, químico y biológico. Los componentes desarrollan interacciones y transformaciones locales y generan el sistema edáfico (Hernández-Jiménez *et al.*, 2006) que utilizamos para la producción agrícola y que generalmente estudiamos desde un punto de vista físico (determinando textura, estructura, profundidad del perfil, la capacidad de retención de agua, drenaje, etc.), químico (determinando el pH, la C.E, nivel de disposición de elementos esenciales, capacidad de intercambio catiónico/aniónico, etc) o biológico (colectando y clasificando una pequeña parte de los organismos vivos que contiene el suelo en tipos de especies y poblaciones) caracterizando de esta forma la fertilidad de los suelos (Benton-Jones, 2012).

Los suelos están conformados por tres fases: sólida, líquida y gaseosa (Sposito, 1981). La relación y la operación de las tres fases dependen de forma compleja de las interacciones y transformaciones físicas, químicas y biológicas. La fase sólida está conformada por diferentes partículas o agregados (Brady y Weil, 1999) de naturaleza inorgánica u orgánica de diferente granulometría. La parte inorgánica está relacionada con el contenido coloidal del suelo que proviene del material parental luego de verse sometido al intemperismo físico, químico y biológico que cambia sus propiedades fisicoquímicas (Gines-Navarro y Navarro, 2003). Las partículas o agregados orgánicos, denominados

**Keywords:** principal component, nutrient dynamics, soil solution.

## Introduction

Soil is a natural body and a complex open system from an energy and matter flow point of view. It is the result of several formation factors, such as the time, parent material, climate, vegetation, organisms and topography, integrated into a system with multiple interactions. For this reason, soil should not be conceptualized as a static system, but as a complex and dynamic system (Jenny, 1994) that in order to study it, we fragmented into its components, placing them in the physical, chemical and biological fields. The components develop interactions and local transformations and generate the edaphic system (Hernández-Jiménez *et al.*, 2006) that we use for agricultural production and generally studied from a physical point of view (determining texture, structure, depth profile, water capacity retention, drainage, etc.), chemical (determining pH, EC, disposition level of essential elements, cation / anion exchange capacity, etc.) or biological (collecting and sorting a small part of living organisms that soil contains in different species and populations) characterizing in this was soil fertility (Benton-Jones, 2012).

Soils are made up of three phases: solid, liquid and gaseous (Sposito, 1981). The relationship and operation of the three phases depend on complex physical, chemical and biological interactions and transformations. The solid phase consists of different particles or aggregates (Brady and Weil, 1999) of inorganic of inorganic or organic nature with different granulometry. The inorganic part is related to the colloidal soil content coming from the parent material after being subjected to physical, chemical and biological weathering changing their physicochemical properties (Gines Navarro and Navarro, 2003). Organic particles or aggregates, collectively called organic matter, accumulate thanks to constant supply of material from organisms, either as waste or as a result of death.

This organic material is subjected to a series of complex transformations by soil microorganisms, resulting in the accumulation of colloids or organic molecules that contribute in a significant manner to the composition and soil fertility (Gines-Navarro and Navarro, 2003). Together the inorganic and organic components of the solid phase

en conjunto materia orgánica, se acumulan gracias al aporte constante de material proveniente de los organismos, ya sea en forma de desechos o como resultado de la muerte.

Este material orgánico es sometido a una serie de transformaciones complejas por parte de los microorganismos del suelo, resultando en la acumulación de coloides o moléculas orgánicas que aportan de manera relevante a la composición y fertilidad del suelo (Gines-Navarro y Navarro, 2003). En conjunto los componentes inorgánico y orgánico de la fase sólida dan lugar a la composición y propiedades del suelo (Buscot, 2005). La fase sólida del suelo posee una mayor estabilidad, menor capacidad de variación y puede servir, en términos generales, para la caracterización del suelo con propósitos taxonómicos. En comparación, la fase líquida y aún más la gaseosa, tienen fluctuaciones grandes y bruscas lo que las hace inadecuadas para la taxonomía de suelos (Gines-Navarro y Navarro, 2003).

Sin embargo desde el punto de vista nutrimental y del manejo de los cultivos la fase líquida es de suma importancia, debido a que está en contacto directo con las raíces de las plantas y es de donde las plantas toman sus nutrientes (Khasawneh, 1971; Menguel and Kirby, 2001). Esta fase está constituida por el agua que se encuentra en los poros del suelo y se le conoce como solución del suelo, agua disponible o agua del suelo (Gines-Navarro y Navarro, 2003). Esta fase del sistema edáfico es *per se* un sistema dinámico y complejo que refleja el impacto global de todos los componentes bióticos y abióticos, incluyendo el proceso de nutrición de las plantas (Snakin, 2001). La teoría de sistemas complejos indica que ciertas propiedades o comportamiento generalmente no son predecibles a partir de las propiedades de los componentes individuales del sistema (García, 2006). Por tal razón, siendo el agua del suelo un sistema dinámico complejo se espera que los detalles específicos de su composición no serán predecibles a partir de las propiedades físicas y químicas de los componentes individuales de la fase sólida (Ryan, 2007). Por esa razón es que se propone estudiar la solución del suelo en su composición y variabilidad temporal, considerándola como la fuente primaria de agua y nutrimentos para las plantas y cuya composición se asocia a grandes rasgos con los componentes inorgánico, orgánico y biótico del suelo, pero sin depender en los detalles de la composición de los componentes individuales de la fase sólida; sino más bien de las interacciones entre sí de los componentes físicos, químicos y biológicos y de estos con el clima prevaleciente en un cierto ámbito temporal.

lead to soil composition and properties (Buscot, 2005). The solid phase of the soil has higher stability, lower capability to change and can serve, in general, for soil characterization with taxonomic purposes. In comparison, the liquid and even more gaseous phase, have large and strong fluctuations which make them unsuitable for soil taxonomy (Gines Navarro and Navarro, 2003).

However, from the nutritional and crop management point of view the liquid phase is critical, because it is in direct contact with plant roots and is where plants take their nutrients (Khasawneh, 1971; Menguel and Kirby, 2001). This phase is constituted by water found in soil pores and is known as soil solution, available water or soil water (Gines-Navarro and Navarro, 2003). This phase of the soil system is *per se* a complex and dynamic system that reflects the overall impact of all biotic and abiotic components; including plant nutrition process (Snakin, 2001). Complex systems theory indicates that certain properties or behaviors generally are not predictable from the properties of individual system components (Garcia, 2006). For this reason, ground water being a complex dynamic system is expected that specific details of its composition will not be predictable from the physical and chemical properties of the individual components of the solid phase (Ryan, 2007). For this reason it is proposed to study soil solution in its composition and temporal variability, considering it as the primary source of water and nutrients for plants and whose composition is associated to large features with inorganic, organic and biotic components of the soil, but not dependent on details of the composition of the individual components of the solid phase; but rather from the interactions within each physical, chemical and biological components and between these with the prevailing climate in a certain time range.

To study the soil solution two properties are considered: the volume of liquid water and the composition of soil solution. The volume directly influences on composition and concentration of the soil solution, as if this change will affect ions concentration (Menguel and Kirby, 2001). Determining water volume is made through physical methods such as wet gravimetric method or by bulk density ( $D_a$ ) and true density ( $D_s$ ) of the soil solid phase (Narro-Farias, 2004). The composition of soil solution is still a more complex situation, due to their dynamic behavior and its multicomponent nature (Khasawneh, 1971), which makes it difficult or even impossible to predict its behavior from the original components which are water and soil solid phase.

Para el estudio de la solución del suelo se consideran dos propiedades: el volumen del agua líquida y la composición de la solución del suelo. El volumen influye directamente sobre la composición y concentración de la solución del suelo ya que si este cambia afectará la concentración de los iones (Menguel y Kirby, 2001). La determinación del volumen del agua se lleva a cabo por medio de métodos físicos como el método gravimétrico de humedad, o mediante la relación densidad aparente ( $D_a$ ) y la densidad real ( $D_s$ ) de la fase sólida del suelo (Narro-Farías, 2004). La composición de la solución del suelo es todavía una situación más compleja, debido a su comportamiento dinámico y a su naturaleza multicomponente (Khasawneh, 1971), lo que hace difícil o hasta imposible predecir su comportamiento a partir de los componentes originales que son el agua y la fase sólida del suelo.

Este tema de la composición de la solución del suelo ha sido estudiado con cierto detalle en el caso de suelos contaminados y tecnosoles, en donde se han reportado predicciones en la solubilidad de Cu, Zn, Cd y Pb (McBride *et al.*, 1997), así como en los niveles de Cd y Zn en la solución del suelo mediante procesos de fitoextracción con *Thlaspi caerulescens* (Knight *et al.*, 1997) y rábano (Lorenz *et al.*, 1997). Pero en el caso de suelos agrícolas no se dispone hasta donde sabemos de información publicada sobre su comportamiento dinámico.

El presente estudio es un acercamiento preliminar y descriptivo al fenómeno del comportamiento dinámico de la solución del suelo. El objetivo fue realizar un análisis de la composición de la solución del suelo a través del tiempo durante las diferentes etapas fenológicas de cinco cultivos en condiciones de producción intensiva en la zona Occidente de México, el cual nos permita describir la relación presente entre los diferentes iones, así como su comportamiento individual y colectivo mediante un análisis de componentes principales (ACP).

## Metodología

El estudio descriptivo de la solución del suelo se realizó en la zona occidente de México en los estados de Jalisco y Colima, iniciando en la temporada verano-otoño del 2013 y terminando durante el invierno del 2014. Se realizaron monitoreos de la solución del suelo en cultivos ya establecidos en diferentes empresas agrícolas. Los cultivos evaluados para este estudio fueron: aguacate (*Persea americana* Mill.) y

This topic of the composition of soil solution has been studied in some detail for polluted soils and technosols, where predictions in solubility of Cu, Zn, Cd and Pb (McBride *et al.*, 1997) have been reported, as well as levels of Cd and Zn in the soil solution through phytoextraction with *Thlaspi caerulescens* (Knight *et al.*, 1997) and radish (Lorenz *et al.*, 1997). But for agricultural soils there is no published information available on dynamic behavior.

The present study is a preliminary and descriptive approach to the phenomenon of dynamic behavior of soil solution. The aim was to perform an analysis of the composition of soil solution over time during different growth stages in five crops under intensive production in western Mexico, which allows us to describe the present relationship between the different ions as well as their individual and collective behavior through a principal component analysis (PCA).

## Methodology

The descriptive study of soil solution was performed in the West area of Mexico in the states of Jalisco and Colima, starting in the summer-autumn 2013 and ending in the winter of 2014. Monitoring soil solution was conducted in crops established in different agricultural enterprises. Crops evaluated for this study: avocado (*Persea americana* Mill.) and cranberry (*Vaccinium* sp.) located in Ciudad Guzman Jalisco at 19° 40' 43.2" N latitude, 103° 32' 06.9" W longitude and 19° 40' 53.13" N latitude, 103° 32' 41.77" W longitude respectively, strawberry (*Fragaria* L.) located in Tapalpa Jalisco (19° 55' 03.3 "N latitude, 103° 42' 11" W longitude), papaya (*Carica papaya* L.) in the municipality of Tecoman Colima (18° 48' 17.58" N latitude, 103° 45' 9.13" W longitude) and pepper (*Capsicum annum*) in Sayula Jalisco (19° 54' 05.4" N latitude, 103° 35' 09.7" W longitude). At the time of study avocado was 5 years old while cranberry was one year old. For the rest of the crops monitoring began from planting stage.

The study included an analysis of the composition of soil solution over time. To do so, soil lysimeters Irrrometer were installed. Six sampling stations were established for each crop and in each sampling station a replication was performed. For this reason, two lysimeters were placed on each station at a depth of 20 cm, at a distance of 20 cm from

arándano (*Vaccinium* sp) ubicados en Ciudad Guzmán Jalisco en las coordenadas 19° 40' 43.2" latitud norte, 103° 32' 06.9" longitud oeste y 19° 40' 53.13" latitud norte, 103° 32' 41.77" longitud oeste respectivamente, fresa (*Fragaria* L.) localizado en Tapalpa Jalisco (19° 55' 03.3" latitud norte, 103° 42' 11" longitud oeste), papaya (*Carica papaya* L.) en el municipio de Tecoman Colima (18° 48' 17.58" latitud norte, 103° 45' 9.13" longitud oeste) y el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum*) en la localidad de Sayula Jalisco (19° 54' 05.4" latitud norte, 103° 35' 09.7" longitud oeste). En el momento del estudio el aguacate tenía cinco años de establecimiento, mientras que el arándano tenía un año. Para el resto de los cultivos el monitoreo se inició desde la etapa de plantación.

El estudio comprendió el análisis de la composición de la solución del suelo a través del tiempo. Para ello se instalaron extractores pasivos de solución del suelo tradicionales denominados lisímetros de la marca Irrrometer. Se establecieron seis estaciones de muestreo para cada cultivo y en cada estación de muestreo se realizó una repetición. Por esta razón, se colocaron dos lisímetros por estación, a una profundidad de 20 cm y a una distancia de 20 cm de la planta, la distancia mínima entre una estación y otra fue de 500 m. La toma de las muestras se efectuó cada 15 días a través de todo el ciclo fenológico de los cultivos (Cuadro 1).

#### Cuadro 1. Número de muestreos por etapa fenológicas para los diferentes cultivos.

Table 1. Number of samples per phenological stage for different crops.

Cultivo	Numero de muestreos por etapa fenológica				
	Crecimiento vegetativo	Floración y fructificación	Desarrollo de fruto	Cosecha	Total de muestras
Aguacate	5	3	3	11	22
Arándano	5	3	3	11	22
Fresa	3	2	1	9	15
Pimiento	3	2	2	15	22
Papaya	4	2	2	14	22

Una vez instalados los lisímetros la obtención de la muestras se realizó efectuando un vacío de -70 kPa. Esta actividad se llevó a cabo en condiciones de capacidad de campo una vez terminada la aplicación del fertirriego. Para determinar la capacidad de campo se contó con un tensiómetro de la marca irrometer modelo R. La recolección de las muestras se efectuó 24 horas después de haber realizado el vacío.

Las muestras de solución de suelo obtenidas fueron analizadas *in situ* mediante equipos portátiles. El pH se determinó con un potenciómetro de la marca Hanna modelo

the plant, the minimum distance between one station and another was 500 m. Samples collection was made every 15 days throughout the crop cycle (Table 1).

Once installed the lysimeters obtaining samples was made by performing a vacuum of -70 kPa. This activity was carried out under field capacity conditions once fertigation was done. To determine field capacity counted with a tensiometer Irrrometer R. The samples collection was performed 24 hours after vacuum.

Soil solution samples were analyzed *in situ* by portable equipment. pH was determined with a potentiometer Hanna HI98130, electrical conductivity (EC) was assessed using an equipment Horiba Spectrum Cardy Twin; ions were analyzed with ion-selective Horiba; for nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) the B743 model was used; calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) with the B751 model; potassium ( $\text{K}^+$ ) with B731 model and sodium ( $\text{Na}^+$ ) with model B722.

#### Statistical analysis

An exploratory analysis, scatter plots and Pearson correlation matrix was performed. An unsupervised statistical analysis of principal components (ACP) with standardized values was made. PCA has many advantages (Broschat, 1979), is a

technique that reduces the dimensionality of a set of multivariate data, removes existing interrelationships between variables, organizes data in orthogonal vectors where each of the variables within the vector behaves in a similar manner based on their correlations, each of these vectors is called a principal component. The first components express most of variance of orthogonal data and are a useful tool to simplify the analysis and interpretation of large amount of variables considered in an exhaustive assessment. Calculations were performed with the language and environment for statistical computing R version 3.1.1 (James *et al.*, 2014).



HI98130, la conductividad eléctrica (CE) se evaluó con un equipo de la marca Horiba modelo Spectrum Cardy Twin; los iones se analizaron con equipos ión-selectivos de la marca Horiba; para los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) se utilizó el modelo B743; calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) con el modelo B751; potasio ( $\text{K}^+$ ) con el modelo B731 y sodio ( $\text{Na}^+$ ) con el modelo B722.

### Análisis estadístico

Se realizó un análisis exploratorio, con diagramas de dispersión y matrices de correlación de Pearson. Se efectuó un análisis estadístico no supervisado de componentes principales (ACP) con valores estandarizados. El ACP presenta múltiples ventajas (Broschat, 1979), es una técnica que reduce la dimensionalidad de un conjunto de datos multivariados, remueve las interrelaciones existentes entre variables, organiza los datos en forma de vectores ortogonales en donde cada una de las variables dentro del vector se comporta en forma similar con base en sus correlaciones, a cada uno de estos vectores se le llama componente principal. Los primeros componentes expresan la mayor parte de la varianza de los datos ortogonales, y son una herramienta útil para simplificar el análisis e interpretación de la gran cantidad de variables consideradas en una evaluación exhaustiva. Los cálculos se realizaron con el lenguaje y ambiente de cómputo estadístico R versión 3.1.1 (James *et al.*, 2014).

## Resultados y discusión

### Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para los diferentes cultivos

Al observar la dinámica nutrimental de las diferentes variables de la solución del suelo a través del tiempo (Figuras 1 a 5) se logra apreciar en los diferentes sitios patrones similares tanto en el comportamiento con respecto al tiempo como en los valores y concentraciones de las distintas variables. Para todos los casos el pH mostró valores fluctuantes, pero siempre manteniendo una tendencia positiva conforme los muestreos fueron avanzando, los valores abarcaron desde 5 hasta 7.8. La C.E mostró tendencia negativa versus el tiempo para el caso del aguacate, arándano y pimienta con niveles iniciales de 0.8, 1.74 y 1.41 respectivamente y decreciendo hacia las etapas finales a valores de  $0.4 \text{ dSm}^{-1}$  para el caso del aguacate y arándano y de  $1 \text{ dSm}^{-1}$  en pimienta. En cambio para los cultivos de fresa y papaya la tendencia de la C.E fue positiva iniciando en valores de 0.6 y 0.87 a 1.4 y 1.8 respectivamente. La concentración de

## Results and discussion

### Dynamics of chemical variables over time for different crops

By observing nutritional dynamics of the different variables of soil solution over time (Figures 1-5) it can be appreciated in the different sites similar patterns in behavior regarding time and values and concentrations of different variables. In all cases pH values fluctuated, but always keeping a positive trend as samplings advanced, the values ranged from 5 to 7.8. EC showed a negative trend versus time for avocado, cranberry and pepper with initial levels of 0.8, 1.74 and 1.41 respectively, decreasing towards final stages to values of  $0.4 \text{ dSm}^{-1}$  for avocado and cranberry and  $1 \text{ dSm}^{-1}$  for pepper. For strawberry and papaya the trend in EC was positive initiating with 0.6 and 0.87 to 1.4 and 1.8 respectively. The concentration of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  showed a decreasing trend for all crops, showing fluctuations in certain samplings; for avocado, cranberry and strawberry  $\text{Na}^+$  values remained on an average range of 154 to 15  $\text{mg L}^{-1}$  and  $\text{K}^+$  levels for the three cases showed increases in their early sampling dates of up to  $296 \text{ mg L}^{-1}$  as for cranberry,  $\text{K}^+$  levels decreased from 231, 296 and 76 to 17, 84 and 28  $\text{mg L}^{-1}$  respectively. For papaya and pepper  $\text{Na}^+$  range was higher, taking values of 487 and 475 to 43 and 136  $\text{mg L}^{-1}$ , respectively, while  $\text{K}^+$  showed a milder decrease, starting in concentrations of 190 to 29  $\text{mg L}^{-1}$  for papaya and from 62 to 2  $\text{mg L}^{-1}$  for pepper.  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{NO}_3^-$  showed the same dynamic pattern, decreasing in all crops except where papaya levels reached 580 and 620  $\text{mg L}^{-1}$  respectively. For the rest of the crops  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{NO}_3^-$  concentration in soil solution decreased showing ranges from 381 to 34  $\text{mg L}^{-1}$  and 418 to 112  $\text{mg L}^{-1}$  (avocado), 250 to 18  $\text{mg L}^{-1}$  and 430 to 65  $\text{mg L}^{-1}$  (cranberry), 180 to 59  $\text{mg L}^{-1}$  and 547 to 271  $\text{mg L}^{-1}$  (strawberry) and from 430 to 27  $\text{mg L}^{-1}$  and 360 to 45  $\text{mg L}^{-1}$  (pepper).

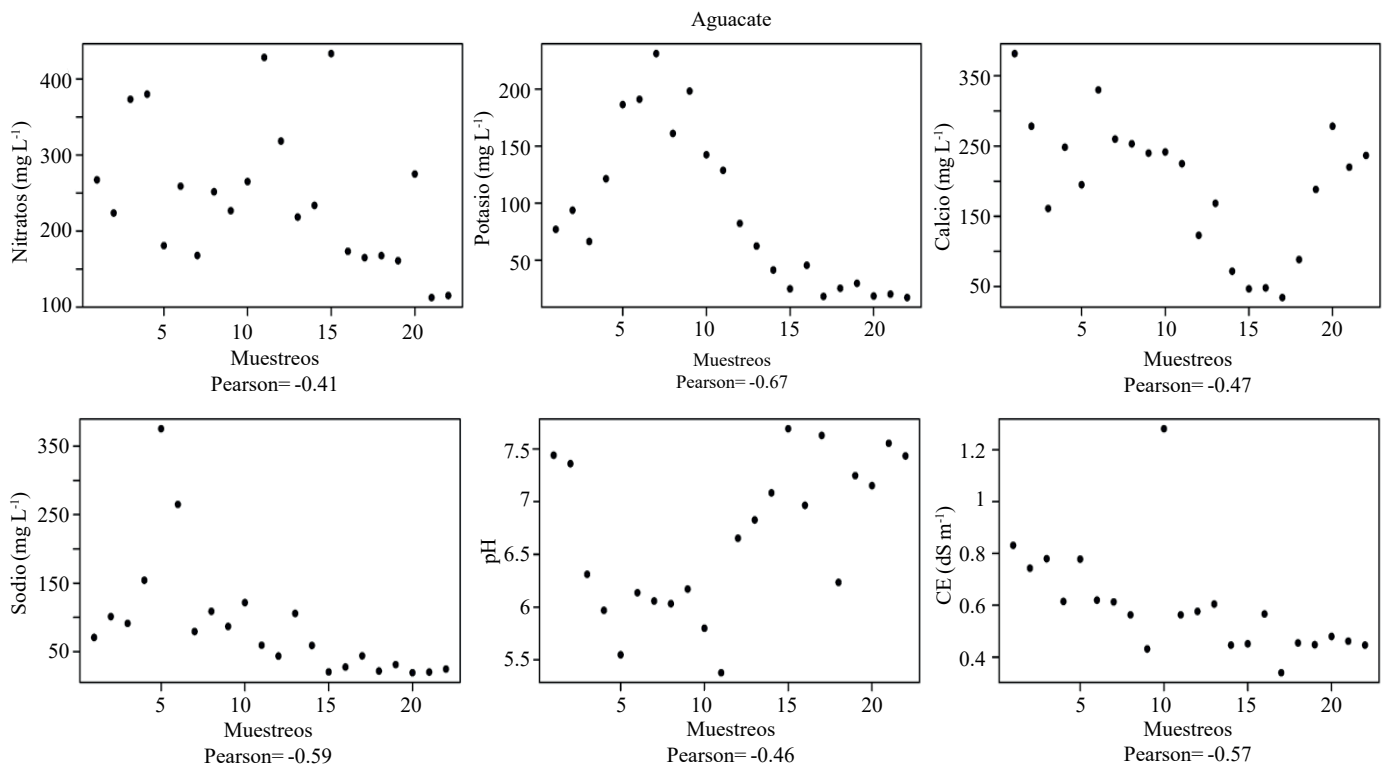
The results found for  $\text{NO}_3^-$  in soil solution for most crops can be given by leaching processes and radical absorption (Navarro-Blaya and Navarro-García, 2003). Both processes may be associated not only with decreased  $\text{NO}_3^-$  but also with other ions ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ) and in general EC of soil solution.

For papaya (Figure 5) an opposite behavior in EC apparently associated to an increase in  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{NO}_3^-$  present in soil solution was observed (Charley and McGarity, 1964; Menguel and Kirby, 2001).

$\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  exhibió tendencia decreciente para todos los cultivos, mostrando fluctuaciones en determinados muestreos; para los cultivos de aguacate, arándano y fresa los valores de  $\text{Na}^+$  se mantuvieron en un rango promedio de 154 a 15  $\text{mg L}^{-1}$  y los niveles del  $\text{K}^+$  para los tres casos presentaron incrementos en sus primeras fechas de muestreo de hasta 296  $\text{mg L}^{-1}$  como es para el caso del arándano, los niveles del  $\text{K}^+$  disminuyeron desde 231, 296 y 76 a 17, 84 y 28  $\text{mg L}^{-1}$  respectivamente. Para la papaya y el pimiento el rango de  $\text{Na}^+$  fue mayor, tomando valores de 487 y 475 a 43 y 136  $\text{mg L}^{-1}$  respectivamente, mientras el  $\text{K}^+$  mostró una disminución más suave, iniciando en concentraciones de 190 hasta 29  $\text{mg L}^{-1}$  para el primer caso y de 62 a 2  $\text{mg L}^{-1}$  para el pimiento. El  $\text{Ca}^{2+}$  y los  $\text{NO}_3^-$  mostraron el mismo patrón dinámico, siendo decrecientes en todos los cultivos a excepción de la papaya donde sus niveles alcanzaron hasta 580 y 620  $\text{mg L}^{-1}$  respectivamente. Para el resto de los cultivos la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NO}_3^-$  en la solución del suelo disminuyó mostrando rangos de: 381 a 34  $\text{mg L}^{-1}$  y 418 a 112  $\text{mg L}^{-1}$  (aguacate), 250 a 18  $\text{mg L}^{-1}$  y 430 a 65  $\text{mg L}^{-1}$  (arándano), 180 a 59  $\text{mg L}^{-1}$  y 547 a 271  $\text{mg L}^{-1}$  (fresa) y de 430 a 27  $\text{mg L}^{-1}$  y 360 a 45  $\text{mg L}^{-1}$  (pimiento).

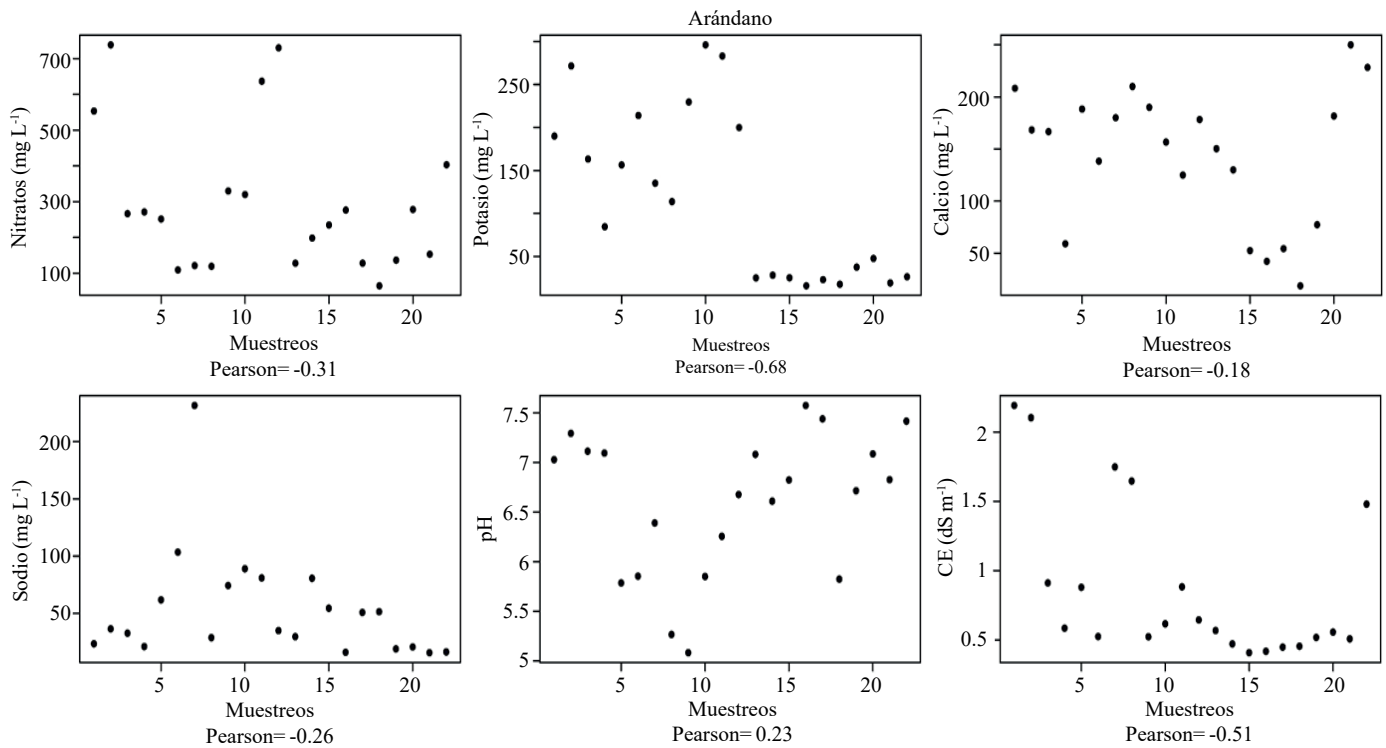
For strawberry (Figure 3) the highest concentration of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{K}^+$  in soil solution is present in early stages, which was described by the absorption curves studied by Molina *et al.* (1993), who pointed out that in its early stages the absorption is very low, increasing simultaneous to fructification. The increasing dynamics from pH of soil solution, observed in all cultures studied, could be due to the alkalizing effect of nitrates from fertilizers applied (Snakin, 2001). Decreases in  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{K}^+$  ions in soil solution is probably due to increased absorption as the crop passes from the vegetative stage to flowering and fruit set, this due to a preference in the absorption of these ions by avocado plants (Figure 1) (Maldonado-Torres *et al.*, 2007), cranberry (Figure 2) (Ferreira *et al.*, 2001) and papaya (Figure 4) (Fallas, 2014).

This decreasing effect on ions present in the soil solution could be related to an increase in the absorption rate of nutrients as the crop grows as observed in strawberry case (Figure 3) (Avitia-García *et al.*, 2014) and pepper (Figure 5) (Rincón *et al.*, 1995).



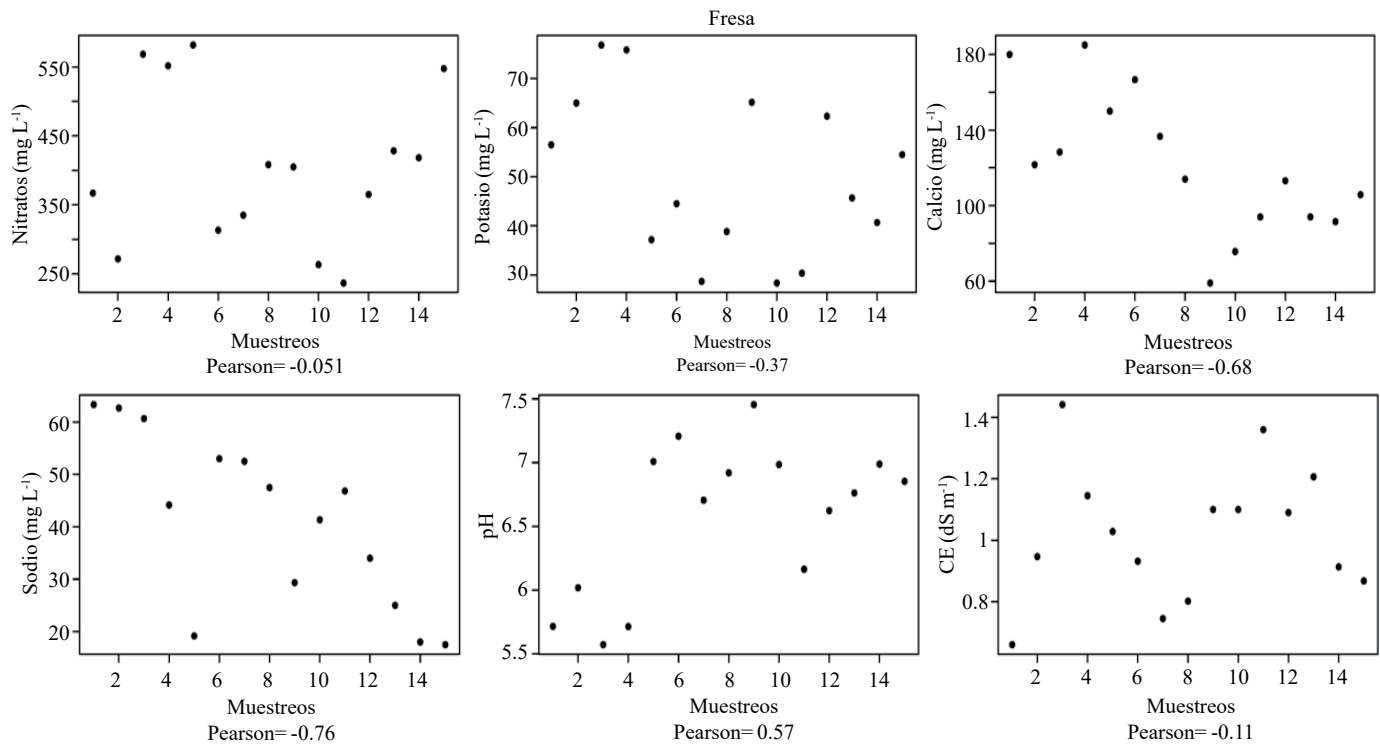
**Figura 1. Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para el cultivo de aguacate, en la parte inferior de las gráficas se indica el coeficiente de correlación de Pearson.**

**Figure 1. Dynamics of chemical variables over time for growing avocado, at the bottom of the graphs the Pearson correlation coefficient indicated.**



**Figura 2. Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para el cultivo de arándano, en la parte inferior de las gráficas se indica el coeficiente de correlación de Pearson.**

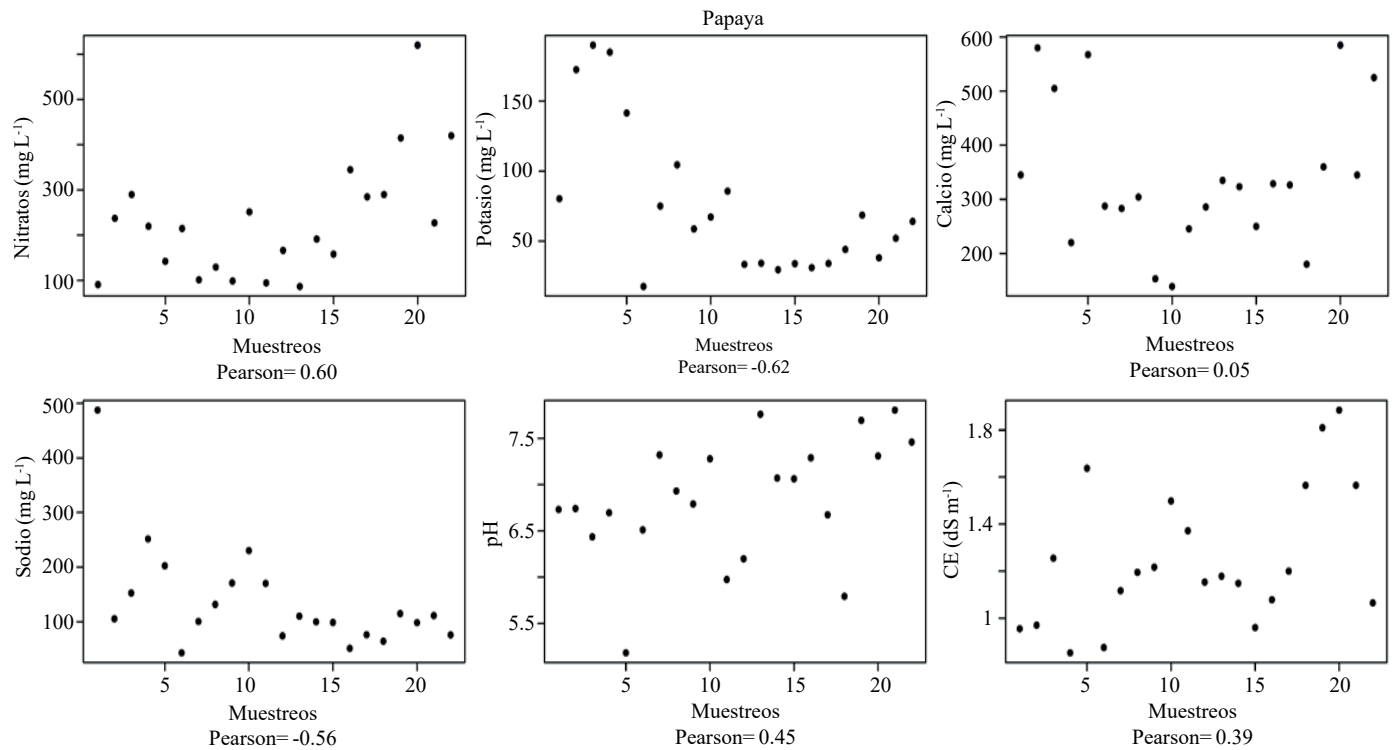
**Figure 2. Dynamics of chemical variables over time for growing blueberry, at the bottom of the graphic Pearson correlation coefficient indicated.**



**Figura 3. Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para el cultivo de fresa, en la parte inferior de las gráficas se indica el coeficiente de correlación de Pearson.**

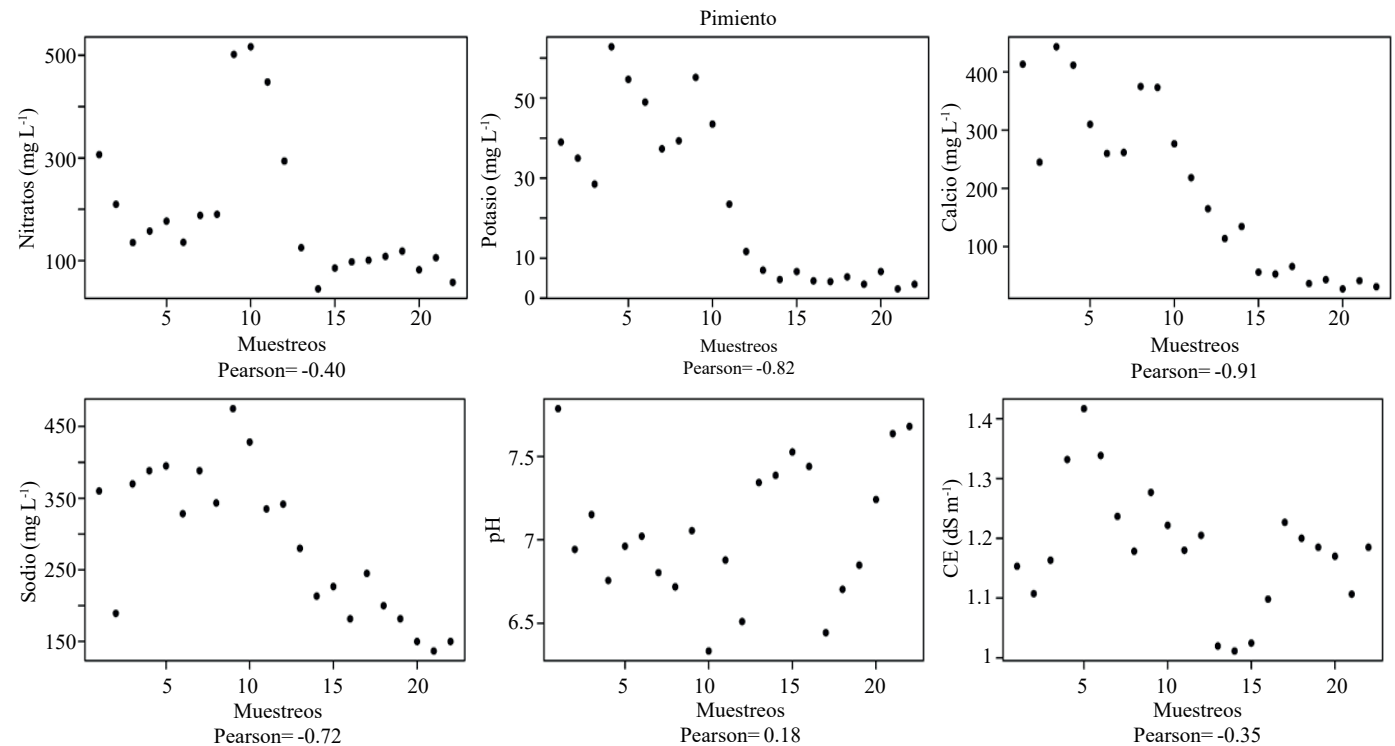
**Figure 3. Dynamic chemical variables over time for the strawberry crop, at the bottom of the graphs the Pearson correlation coefficient indicated.**





**Figura 4. Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para el cultivo de papaya, en la parte inferior de las gráficas se indica el coeficiente de correlación de Pearson.**

**Figure 4. Dynamic chemical variables over time for growing papaya, at the bottom of the graphs the Pearson correlation coefficient indicated.**



**Figura 5. Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para el cultivo de pimienta, en la parte inferior de las gráficas se indica el coeficiente de correlación de Pearson.**

**Figure 5. Dynamics of chemical variables over time for the pepper crop, at the bottom of the graphic Pearson correlation coefficient indicated.**

Los resultados encontrados para el  $\text{NO}_3^-$  en la solución del suelo para la mayoría de los cultivos pueden estar dados por los procesos de lixiviación y absorción radical (Navarro-Blaya y Navarro-García, 2003). Ambos procesos pudieron asociarse no solamente con la disminución del  $\text{NO}_3^-$  sino también con la otros iones ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ) y en general con la CE de la solución del suelo.

Para el caso de la papaya (Figura 5) se observó un comportamiento contrario en la CE asociado aparentemente al incremento de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NO}_3^-$  presente en la solución del suelo (Charley y McGarity, 1964; Menguel y Kirby, 2001).

En el caso de la fresa (Figura 3) la mayor concentración de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{K}^+$  en la solución del suelo se presentó en las primeras etapas lo cual fue descrito por las curvas de absorción estudiadas por Molina *et al.* (1993), quien indica que en sus primeras etapas la absorción es muy baja, incrementándose posteriormente en forma coincidente con la fructificación. La dinámica ascendente del pH de la solución del suelo, observada en todos los cultivos estudiados, pudiera deberse al efecto alcalinizante de los nitratos aplicados con los fertilizantes (Snakin, 2001). Las disminuciones de los iones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  en la solución del suelo, es probablemente debida al aumento de absorción conforme el cultivo pasa de la etapa vegetativa a la de floración y llenado de frutos, esto debido a una preferencia en la absorción de estos iones por las plantas de aguacate (Figura 1) (Maldonado-Torres *et al.*, 2007), arándano (Figura 2) (Ferreira *et al.* 2001) y papaya (Figura 4) (Fallas 2014).

Este efecto decreciente en los iones presentes en la solución del suelo pudiera relacionarse con un incremento en la tasa de absorción de nutrientes a conforme el cultivo se desarrolla como se observa en el caso de la fresa (Figura 3) (Avitia-García *et al.*, 2014) y del pimiento (Figura 5) (Rincón *et al.*, 1995).

Para el arándano otro factor posiblemente involucrado en la reducción de los iones en la solución del suelo (Figura 2), sería por una parte la fijación en las partículas del suelo o bien, en el caso de suelos arenosos, por la lixiviación (Hancock y Draper, 1989). Para el caso de la disminución de  $\text{Na}^+$  en la solución del suelo (Figura 2) se ha reportado que el arándano tiende a absorberlo en niveles altos en los tejidos foliares, esto debido a que carece de un mecanismo de regulación de la absorción de este elemento (Spiers, 1983).

For cranberry another factor possibly involved in the reduction of ions in the soil solution (Figure 2), would on one hand the fixation in soil particles or in the case of sandy soils through leaching (Hancock and Draper, 1989). For decreasing  $\text{Na}^+$  in the soil solution (Figure 2) it has been reported that cranberry tends to absorb it in high levels in leaf tissue, this because it lacks a mechanism of regulating the uptake of this element (Spiers, 1983).

### First principal component analysis

Data obtained in the study from the dynamics of the composition of soil solution for five different crops, underwent an unsupervised multivariate statistical analysis called principal component. Consisted in the creation of new variables called principal components from the original variables ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , pH and EC). With this method accomplished to create a linear function with which was possible to explain the multivariate behavior of the system comprised by the soil solution. For this purpose the values of the principal components were obtained and defined using only the first principal component which groups the highest variance. For avocado groups 50%, cranberry 40%, strawberry 40%, papaya 33% and pepper 62%.

The load vectors obtained for the first principal component (Table 2) were identified the highest absolute value for each crop studied, determining with this which variable contributed the most to the variation of the first component. For avocado and cranberry was the most important variable was  $\text{K}^+$ , for strawberry pH, for papaya  $\text{NO}_3^-$  and pepper  $\text{Na}^+$ . These characters of the soil solution could rule as conditioning variables (independent variables) (Jenny, 1994), in the dynamic behavior of the system and presumably are different in each culture for being different soils and geographical sites.

Despite soil and crops diversity, it was found in the behavioral set of load vectors a pattern in all crops: the values of load coefficients were positive for pH and negative for most of the remaining cases (Table 2). This result indicates that in all cases pH tends to rise during crop growth, indicating a deficit in the protonation of soil solution, possibly resulting from the absence of a suitable concentration of organic matter, which is known to be the repository for exchanging  $e^-/\text{H}^+$  (Menguel and Kirby, 2001) and the aforementioned effect of alkalization by applying  $\text{NO}_3^-$  in fertilizers (Snakin, 2001). The rest of the coefficients, of negative sign, indicate the trend towards decline in the availability of mineral nutrients in soil solution. A possible explanation for this would be insufficient capacity of

### Análisis del primer componente principal

A los datos obtenidos en el estudio de la dinámica de la composición de la solución del suelo para los cinco diferentes cultivos, se les realizó un análisis estadístico multivariado no supervisado llamado componentes principales. Consistió en la creación de nuevas variables, denominadas componentes principales, a partir de las variables originales ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , pH y CE). Con este método lo que se logró fue crear una función lineal con la cual explicar el comportamiento multivariado del sistema constituido por la solución del suelo. Para ello se obtuvieron los valores de los componentes principales y se determinó utilizar solo el primer componente principal el cual agrupa la mayor varianza. Para el caso del aguacate agrupa el 50%, arándano el 40%, fresa el 40%, papaya el 33% y pimienta 62%.

A los vectores de carga obtenidos para el primer componente principal (Cuadro 2) se les identificó el mayor valor absoluto para cada cultivo estudiado, determinando con esto cual variable fue la que más contribuyó a la variación del primer componente. Para el caso del aguacate y arándano la variable más importante fue  $\text{K}^+$ , para el caso de la fresa fue el pH, para la papaya fue el  $\text{NO}_3^-$  y para el pimienta fue el  $\text{Na}^+$ . Estos caracteres de la solución del suelo pudieran regir como variables de acondicionamiento (variables independientes) (Jenny, 1994), en el comportamiento dinámico del sistema y presumiblemente son diferentes en cada cultivo por tratarse de distintos suelos y sitios geográficos.

**Cuadro 2. Vectores de carga estandarizados del primer componente principal de las diferentes variables evaluadas para los diferentes cultivos.**

**Table 2. Vectors standardized load the first principal component of the different variables evaluated for different crops.**

Cultivo	$\text{NO}_3^-$	K	Ca	Na	pH	CE
Aguacate	-0.1522949	-0.5150672	-0.3461659	-0.4589865	0.4799535	-0.3881459
Arándano	-0.4376725	-0.552387	-0.4454199	-0.1942398	0.1969363	-0.4779116
Fresa	-0.1759529	-0.4524127	-0.4716661	-0.4407098	0.5840698	-0.0808183
Papaya	0.6027989	-0.2921512	0.3030348	-0.4520469	0.3473081	0.3667176
Pimienta	-0.3693642	-0.4743096	-0.4418701	-0.4821241	0.2706356	-0.3710311

A pesar de la diversidad de suelos y cultivos, en el comportamiento conjunto de los vectores de carga se encontró un patrón en todos los cultivos: los valores de los coeficientes de carga fueron positivos para el pH y negativos para la gran mayoría de los casos restantes (Cuadro 2). Este resultado indica que en todos los casos el pH tiene a elevarse

the solid phase of the soil to provide the necessary nutrients in the soil solution (Menguel and Kirby, 2001) to cover all crops needs, this despite the contribution of fertilizers via fertigation.

By observing the dynamic behavior of the first principal component it can be seen the variability of the observations versus time or samples number, finding that the dynamics of the first principal component was similar to the six crops, with a clear upward trend (Figure 6). This rising trend is largely governed by the variables with greater weight in the first principal component.

These variables, through load coefficients, are negative for avocado, cranberry and pepper, while for strawberry and papaya are positive. A possible answer to this similarity would be given by pH of the soil solution over time, which as mentioned previously, for all cases showed positive correlation (Figure 1, 2, 3 and 5) and is associated in a very similar way to the principal component (Figure 6) over time. This happens for all crops except papaya (Figure 4), where  $\text{NO}_3^-$  plays a key role in the rising behavior of the principal component. In all cases the first component shows a positive trend over time, which indicates the possible presence of a temporal pattern in joint dynamics of the attributes of the soil solution.

These results seem to suggest on one hand the effectiveness of the first principal component in shaping joint dynamics of soil solutions in different crops; in particular, it is an integration of the results presented above in univariate analysis of different ions for different crops over time.

On the other hand, the dynamics described indicates the plausibility of modeling the behavior of a complex system such as soil solution, while not using any single variable or group of variables analyzed individually, but a linear function of the variables determined in soil water. It is possible that increasing the number of variables determined in the soil

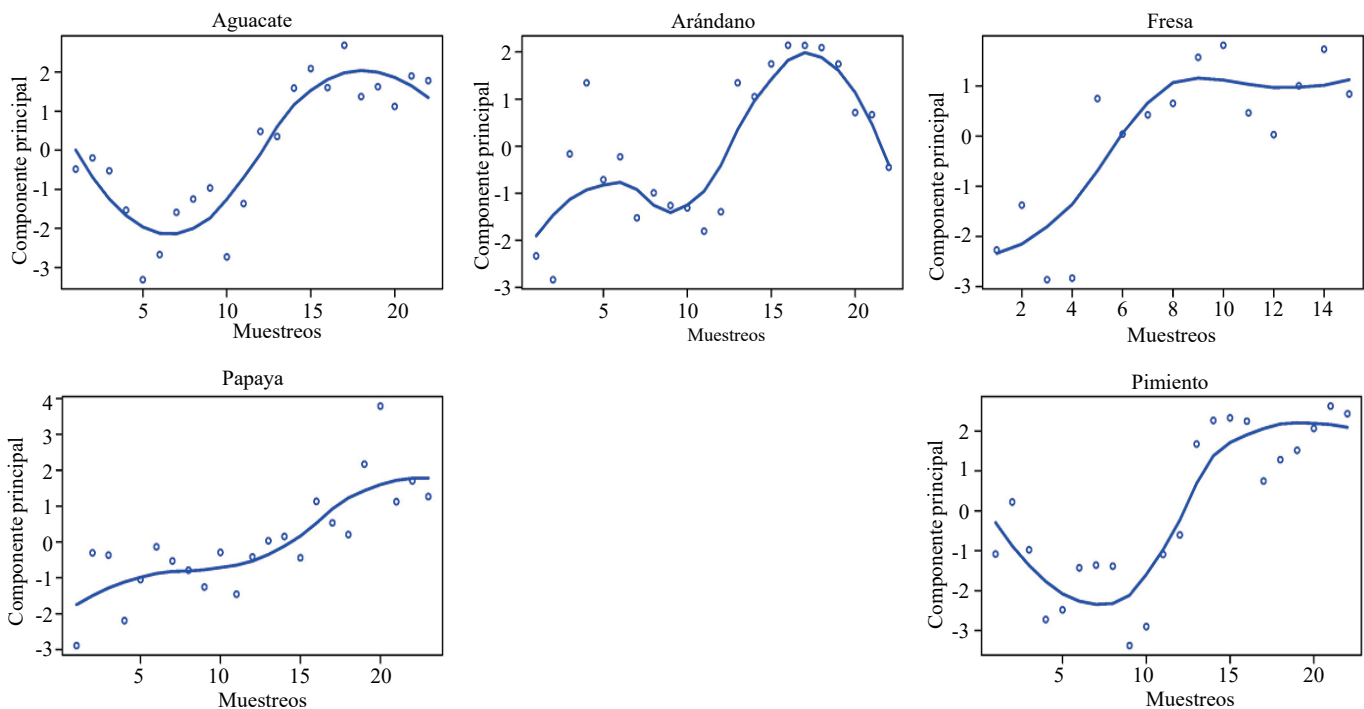
durante el crecimiento del cultivo, indicando un déficit en la protonación de la solución del suelo, posiblemente derivado de la ausencia de una adecuada concentración de materia orgánica, la cual se sabe es el repositorio para el intercambio de  $e^-/H^+$  (Menguel y Kirby, 2001) así como del ya mencionado efecto de alcalinización por la aplicación de  $NO_3^-$  en los fertilizantes (Snakin, 2001). El resto de los coeficientes, de signo negativo, indican la tendencia a la caída en la disponibilidad de nutrientes minerales en la solución del suelo. Una posible explicación de lo anterior sería insuficiente capacidad de la fase sólida del suelo para aportar los nutrientes necesarios en la solución del suelo (Menguel y Kirby, 2001) como para cubrir todas las necesidades del cultivo, ello a pesar del aporte de fertilizantes vía fertirriego.

Al observar el comportamiento dinámico del primer componente principal podemos ver la variabilidad de las observaciones versus el tiempo o número de muestreos, encontrándose que la dinámica del primer componente principal fue parecida para los seis cultivos, con una clara tendencia ascendente (Figura 6). Este comportamiento ascendente está regido mayormente por las variables con mayor ponderación en el primer componente principal.

solution the modeling power is higher to predict the joint dynamic behavior. Such studies should be performed to verify if the study of the soil solution can be a useful supplement to traditional studies in the solid phase of the soil.

From Dokuchaev times raised that the knowledge of soils is the mean to dominate and lead them with goals applied to agriculture (Hernandez-Jimenez *et al.*, 2006). Based on the findings of this research can be inferred that it is possible to predict nutrient dynamics of soil solution in soils with agricultural management. This behavior could be modified by changing crop management and/or land use and therefore have consequences on the pattern of the principal component. This effect in modifying the soil solution has been reported by Snakin *et al.* (2001), who indicates that in forest soils without human intervention the variability of the solution tends to decrease, which could make the predictive study of the soil solution easier.

The author indicates that human activities could create dynamic heterogeneity additional to that arising naturally in certain soil characteristics. The latter supports the findings in this study where agricultural soils on the one hand seem to



**Figura 6. Comportamiento del primer componente principal a través del tiempo para los diferentes cultivos estudiados.**  
**Figure 6. Performance of the first principal component over time for different crops studied.**

Dichas variables, a través de los coeficientes de carga, son negativas para el aguacate, arándano y pimiento, mientras que para los cultivos de fresa y papaya son positivas. Una

show a similar multivariate dynamic that seems to suggest common patterns of behavior in different systems, but with specific heterogeneities in the case of each crop and surely

posible respuesta para esta similitud estaría dada por el pH de la solución del suelo a través del tiempo, el cual como se mencionó con anterioridad, para todos los casos presenta correlación positiva (Figura 1, 2, 3 y 5) y se asocia de forma muy similar al del componente principal (Figura 6) a través del tiempo. Esto sucede para todos los cultivos con excepción de la papaya (Figura 4), donde los  $\text{NO}_3^-$  juegan un papel clave en el comportamiento ascendente del componente principal. En todos los casos el primer componente presenta una tendencia positiva a través del tiempo, lo que nos indica la posible presencia de un patrón temporal en la dinámica conjunta de los atributos de la solución del suelo.

Estos resultados por una parte parecen indicar la efectividad del primer componente principal en modelar la dinámica conjunta de las soluciones del suelo en los diferentes cultivos. En particular es una integración de los resultados que se presentaron anteriormente en los análisis univariados de los diferentes iones para los distintos cultivos a través del tiempo.

Por otro lado, la dinámica descrita señala la plausibilidad de modelar el comportamiento de un sistema complejo como es la solución del suelo, si bien no utilizando alguna variable individual, o grupos de variables analizadas de manera individual, sino una función lineal de las variables determinadas en el agua del suelo. Es posible que al aumentar el número de variables determinadas en la solución del suelo sea mayor el poder del modelo para predecir el comportamiento dinámico conjunto. Dichos estudios deben realizarse para verificar si el estudio de la solución del suelo puede ser un complemento útil a los tradicionales estudios realizados en la fase sólida del suelo.

Desde los tiempos de Dokuchaev se planteó que el conocimiento de los suelos es el medio de dominarlos y dirigirlos con objetivos aplicados a la agricultura (Hernandez-Jimenez *et al.*, 2006). En base a lo encontrado en esta investigación podemos inferir que es posible la predicción de la dinámica nutrimental de la solución del suelo en suelos con manejo agrícola. Este comportamiento podría verse modificado al cambiar el manejo del cultivo y/o uso del suelo y por ende tendrá consecuencias en el patrón del componente principal. Este efecto en la modificación de la solución del suelo se ha reportado por Snakin *et al.* (2001), quien indica que en suelos de bosque sin intervención humana la variabilidad de la solución tiende a decrecer, lo cual pudiera hacer más sencillo el estudio predictivo de la solución del suelo.

comes from each specific combination soil - plant species-agronomic management. Also have been reported results of a daily cyclical behavior of pH, redox potential and calcium in the soil solution in forests (Snakin, 1983), but without finding similar trends in the different soils. Currently there is no information on the composition dynamics of the soil solution over time for crops as well as for multivariate statistical analyzes that attempt to explain or predict the behavior of the soil solution system.

It is essential to continue with these types of studies and repeat them in subsequent years adding more variables as well as other ions ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{MoO}_4^{2-}$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , etc.), oxide reduction potential (ORP), concentration of organic acids (malate, citrate, lactate, etc.), titratable acidity, populations and species of bacteria, fungi and protists or metagenomic studies thereof, among others. It would also be of great importance to perform such work under natural conditions without human intervention or in rainfed, reduced tillage or organic farming areas, to determine if in spite of the different soil conditions exist common patterns among them as those are described in this study.

This study explores the broad picture about soil composition and its behavior. It offers the prospect of evaluating the soil solution as a complement to classical physicochemical determinations performed on samples of the soil solid phase.

From the methodological point of view, this paper illustrates the usefulness of principal component analysis, as a useful tool for the descriptive study of the soil solution, as being a complex and dynamic system it consists of many elements that govern their behavior both individually and collectively. Studying the individual components separately without an integrative dimension reduction tool, would fail in exploring joint dynamics from soil solution systems, where not only considers the behavior of individual attributes, but the system as a whole that emerges from the components connected by its interactions and interdependencies.

## Conclusions

The individual behavior of chemical variables of the soil solution showed similar response patterns for avocado, cranberry and pepper with negative trends for all variables



El mismo autor indica que las actividades humanas pudieran crear heterogeneidad dinámica adicional a la que naturalmente surge de las características de cierto suelo. Lo anterior apoya lo encontrado en este estudio en donde los suelos agrícolas por una parte parecen mostrar una dinámica multivariada análoga que parece indicar patrones de comportamiento comunes en los diferentes sistemas, pero con heterogeneidades específicas en el caso de cada cultivo y que seguramente provienen de cada combinación específica suelo-especie vegetal-manejo agronómico. También se han reportado resultados de un comportamiento cíclico diario del pH, potencial redox y calcio en la solución del suelo en bosques (Snakin, 1983), pero sin encontrarse tendencias similares en los diferentes suelos. En la actualidad no existe información sobre la dinámica de la composición de la solución del suelo a través del tiempo para cultivos así como tampoco análisis estadísticos multivariados que intenten explicar o predecir el comportamiento del sistema de la solución del suelo.

Es indispensable seguir con estos tipos de estudio y repetirlos en los años subsiguientes adicionando mayor número de variables como son otros iones ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{MoO}_4^{2-}$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , etc), el potencial de óxido-reducción (ORP), la concentración de ácidos orgánicos (malato, citrato, lactato, etc.), acidez titulable, poblaciones y especies de bacterias, hongos y protistas o bien estudios metagenómicos de los mismos, entre otras. También sería de gran importancia el realizar este tipo de trabajos bajo condiciones naturales sin intervención humana o bien en zonas agrícolas de temporal, labranza reducida o agricultura orgánica, para determinar si a pesar de las diferentes condiciones existentes en los suelos existen patrones comunes entre ellos como los descritos en este estudio.

Este estudio explora el amplio panorama acerca de la composición del suelo y de su comportamiento. Ofrece la perspectiva de evaluar la solución del suelo como un complemento a las clásicas determinaciones fisicoquímicas realizadas en muestras de la fase sólida del suelo.

Desde el punto de vista metodológico, este trabajo ilustra la utilidad del análisis de componentes principales, como una herramienta útil para el estudio descriptivo de la solución del suelo, ya que al ser un sistema complejo y dinámico está conformado por infinidad de elementos que rigen su comportamiento tanto de forma individual como colectiva. El estudiar por separado los componentes

except pH. This same behavior was exhibited by strawberry with the difference that in addition to pH, EC also tended to increase over time.

For papaya chemical variables such as  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , pH and EC showed an upward trend against time while the  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$  were reduced.

The study demonstrated the feasibility of applying multivariate simulation in describing the dynamic behavior of the soil solution.

The results show that regardless of soil type, location and even crop, there are similar behavior patterns and potentially predictable that would allow predicting the dynamic behavior of the soil solution.

*End of the English version*



## Literatura citada

- Avitia-García, E.; Pineda-Pineda, J.; Castillo-González, A. M.; Trejo-Téllez, L. I.; Corona-Torres, T. y Cervantes-Urbán, E. 2014. Extracción nutrimental en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.). México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 3(5):519-524.
- Benton-Jones, J. J. 2012. Plant nutrition and soil fertility manual (second edition). CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, Florida, USA. 271 p.
- Brady, N. C. and Weil, R. R. 1999. The nature and properties of soils. 12th Ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, USA. 881 p.
- Broschat, T. K. 1979. Principal component analysis in horticultural research. United States. HortScience 14(1):114-117.
- Buscot, F. 2005. Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions. Springer. Berlin, Alemania. 403 p.
- Charley, J. L. and McGarity, J. L. 1964. High soil nitrate-levels in patterned saltbush communities. United Kingdom. Nature. 201:1351-1352.
- Fallas, R.; Bertsch, F. y Barrientos, M. 2014. Curvas de absorción de nutrientes en papaya (*Carica papaya* L.) CV. "Pococi" en las fases de crecimiento vegetativo, floración e inicio de cosecha. Costa Rica. Agronomía Costarricense. 38(2):43-54.
- Ferreira, E. R.; Peralta, C. J.; Sadzawka, R. A.; Muñoz, S. C. and Valenzuela, V. J. 2001. Efecto de la acidificación del sustrato y del agua de riego en la nutrición, desarrollo y producción de arándano ojo de conejo (*Vaccinium ashei* Reade). Chile. Agricultura técnica. 61(4):452-458.
- García, R. 2006. Sistemas complejos: conceptos, métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. Gedisa Editorial. Barcelona, España. 199 p.
- Gareth, J.; Witten, D.; Hastie, T. and Tibshirani, R. 2014. An Introduction to Statistical Learning with Applications in R. Springer. New York, USA. 419 p.
- Hancock, J. F. and Draper, A. D. 1989. Blueberry culture in North America. USA. Hortscience. 24(4):551-556.

individuales sin una herramienta integradora de reducción de dimensiones, fallaría en la exploración de la dinámica conjunta del sistema de la solución del suelo, en donde no solamente cuenta el comportamiento de los atributos individuales, sino del sistema en conjunto que emerge de los componentes unidos por sus interacciones e interdependencias.

## Conclusiones

El comportamiento individual de las variables químicas de la solución del suelo mostró patrones de respuesta similar para los cultivos de aguacate, arándano y pimiento con tendencias negativas para todas las variables a excepción del pH. Esta misma conducta exhibió el cultivo de fresa con la diferencia que adicional al pH la CE también tendió a incrementar a través del tiempo.

Para el cultivo de papaya las variables químicas como son los  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , pH y CE mostraron tendencia al incremento frente al tiempo mientras que el  $\text{K}^+$  y el  $\text{Na}^+$  se redujeron.

El estudio demostró la factibilidad de aplicar la modelación multivariada en la descripción del comportamiento dinámico de la solución del suelo.

Los resultados demuestran que, independientemente del tipo de suelo, la ubicación y hasta del cultivo, existen patrones de comportamiento similar y potencialmente predecible que permitirían predecir el comportamiento dinámico de la solución de suelo.

## Agradecimiento

Los autores(a) agradecen a Tradecorp México S. A. y Nevada Chemicals S. A. de C. V. por el apoyo económico y logístico para la realización de la presente investigación.

- Hans, J. 1994. FACTORS OF SOIL FORMATION A System of Quantitative Pedology. Dover Publications, INC. New York, New York, USA. 271 p.
- Hernández-Jiménez, A.; Ascanio-García, M. O.; Morales-Díaz, M.; Bojórquez-Serrano, J. I.; García-Calderon, N. E. y García-Paredes, J. 2006. EL SUELO: fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo. Universidad Autónoma de Nayarit. Nayarit, México. 231 p.
- Khasawneh, F. E. 1971. Solution Ion Activity and Plant Growth. USA. Soil Sci. Soc. Amer. 35:426-436.
- Knight, B.; Zhao, F. J.; McGrath, S. P. and Shen, Z. G. 1997. Zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentration and chemical speciation of metals in soil solution. Netherlands. Plant and Soil. 1(197):71-78.
- Lorenz, S. E.; Hamon, R. E.; Holm, P. E.; Domingues, H. C.; Sequeira, E. M.; Christensen, T. H. and McGrath, S. P. 1997. Cadmium and zinc in plants and soil solutions from contaminated soils. Netherlands. Plant and Soil. 1(189):21-31.
- Maldonado-Torres, R.; Álvarez-Sánchez, M. E.; Almaguer-Vargas, G.; Barrientos-Priego, A. F. y García-Mateos, R. 2007. Estándares nutrimentales para aguacatero "hass". México. Revista Chapingo Serie Horticultura. 13(1):103-108.
- Mcbride, M.; Sauve, S. and Hendershot, W. 1997. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. United Kingdom. European Journal of Soil Science. 2(48):337-346.
- Mengel, K. and Kirkby, E. A. 2001. Principles of Plant Nutrition (5th Edition). Springer. Dordrecht, The Netherlands. 807 p.
- Molina, E.; Salas, R. y Castro, A. 1993. Curva de crecimiento y absorción de nutrimentos en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch. Cv. Chandler) en Alajuela. Costa Rica. Agronomía Costarricense. 17(1):63-67.
- Narro-Farias, E. 2004. Física de suelos: con enfoque agrícola. Editorial Trillas. México D. F, México. 195 p.
- Navarro-Blaya, S. y Navarro-García, G. 2003. Química Agrícola. Mundi-prensa. Barcelona, España. 479 p.
- Snakin, V. V. 1983. Some soil regimes by in situ-metry data. In: Russian chernozem. A hundred years after Dokuchaev. Kovda, V. A and Samoilova, E. M. (Eds.). Nauka Publ. Moscow, Russian. 79-89 pp.
- Snakin, V. V.; Prisyazhnaya, A. A. and Kovács-Láng, E. 2001. Soil Liquid Phase Composition. Elsevier Science B. V. Amsterdam, The Netherlands. 316 p.
- Spiers, J. M. 1983. Influence of N, K, and Na concentration on growth and leaf element content of "tifblue" rabbiteye blueberry. USA. HortScience. 18(1):223-224.
- Sposito, G. 1981. The thermodynamics of soil solutions. Oxford Clarendon Press. New York, United States. 223 p.
- Rincón, L.; Saez, J.; Balsalobre, E. y Pellicer, C. 1995. Crecimiento y absorción de nutrientes del pimiento grueso en cultivo bajo invernadero. España. Invest. Agr. Prod. Prot. Veg. 10(1):47-59.
- Ryan, A. J. 2007. Emergence is coupled to scope, not level. United States. Complexity. 13(2):67-77.