

Manejo integrado de nutrientes en sistemas agrícolas intensivos: revisión*

Integrated nutrient management in intensive agricultural systems: a review

Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena^{1§}, Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena¹ y Carlos Alberto Ortiz Solorio¹

Colegio de Postgraduados- Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco, km 36.5, Montecillos, Texcoco, Estado de México. C. P. 56230. Tel: 9520200. Ext. 1229 y 1227. (castor@colpos.mx; ortiz@colpos.mx). §Autor para correspondencia: vladimir@colpos.mx.

Resumen

En la actualidad, la producción intensiva de alimentos tanto a cielo abierto como en agricultura protegida está influenciada por diversos factores como manejo, óptima administración, operación y utilización del agua, demanda total de nutrientes, capacidad de abastecimiento y reserva de elementos nutritivos por el suelo, suministro y adición orgánica e inorgánica de nutrientes a la zona radical. Todos estos componentes son parte de un nuevo paradigma en el manejo integrado de nutrientes, en donde se debe garantizar la seguridad alimentaria en un futuro, además de fortalecer la sustentabilidad y sostenibilidad de los sistemas productivos agrícolas intensivos y su relación con el medio ambiente. El objetivo del presente trabajo fue realizar una revisión de literatura sobre las estrategias que se han implementado en el manejo agronómico y la sustentabilidad de los sistemas agrícolas en años recientes y propuestas metodológicas de cultivos a partir de su importancia para el consumo humano e implicaciones en el deterioro de ecosistemas.

Palabras claves: agua y agroecosistemas, agricultura protegida, producción directa a cielo abierto, sostenibilidad de suelo.

Abstract

Currently, intensive food production both open and protected agriculture is influenced by various factors such as management, optimal management, operation and use of water, total demand of nutrient, supply capacity and reserves of nutrients for the soil, supply and addition of organic and inorganic nutrients to the root zone. All these components are part of a new paradigm in integrated nutrient management, where food security must be ensured in the future, in addition to strengthening the sustainability of intensive agricultural production systems and their relationship with the environment. The aim of this study was to conduct a literature review on strategies that have been implemented in the agronomic management and sustainability of agricultural systems in recent years and methodological proposals of crops from its importance for human consumption and implications in the deterioration of ecosystems.

Keywords: no-till farming, protected agriculture, sustainability of soil, water and agro-ecosystems.

* Recibido: septiembre de 2014
Aceptado: noviembre de 2014

Introducción

El manejo nutrimental, en los sistemas agrícolas de producción intensiva, está enfocado a la obtención de altos rendimientos por unidad de superficie tanto a cielo abierto como en los sistemas de agricultura protegida (invernadero), con el objetivo de incrementar y proveer de alimentos a la población. Las nuevas variedades y mejoramiento de híbridos (en cereales y hortalizas), incremento en la aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, inversiones masivas en infraestructura de irrigación y fertirriego han justificado el aumento del potencial de rendimiento de varios cultivos. Además, se ha reducido el tiempo entre la siembra y la madurez del cultivo y se ha logrado obtener de dos a tres cosechas en un año agrícola. En el futuro se plantea que el incremento en la producción de cultivos seguirán siendo las tierras destinadas a la producción agrícola intensiva, pero estos sistemas a su vez deberán cumplir con estrictas normas ambientales. Por lo tanto, una intensificación agro-ecológica de los sistemas de producción de cereales sólo será justificable si se toma en cuenta la seguridad alimentaria, la disponibilidad de tierras y los recursos hídricos requeridos para este fin (Cassman, 1999).

La clave del problema estará en visualizar e involucrar a todos los elementos como una gestión integral de la explotación, que conduzca al buen desarrollo de los cultivos y al mismo tiempo mejore y mantenga la sustentabilidad y calidad ambiental del sistema productivo.

Este cambio de paradigma plantea grandes retos, la agricultura intensiva se correlaciona negativamente con la biodiversidad en paisajes agrícolas (Smith *et al.*, 2013) ya que el uso de fertilizantes inorgánicos han contribuido a generar problemas ambientales en suelos y ecosistemas, agua superficial y subterránea, pobreza nutrimental e inducir a la pérdida de materia orgánica (Manlay *et al.*, 2007).

La FAO (1998) propuso efectuar un manejo nutrimental integrado en los sistemas productivos a través, del mejoramiento de la productividad por medio de un uso equilibrado de fertilizantes inorgánicos combinados con fuentes orgánicas, balance y eficiencia de nutrientes en el suelo y los absorbidos por las plantas. En este manejo integral deben de colaborar agrónomos, edafólogos, ecologistas y autoridades ambientales (Snyder *et al.*, 2009). Desde entonces, las publicaciones sobre estrategias en el manejo agronómico intensivo, sustentable y sostenible de los sistemas agrícolas en producción se han incrementado

Introduction

The nutrient management in farming systems of intensive production is focused on obtaining high yields per unit area both field and protected agriculture systems (greenhouse), in order to increase and provide food for the population. New varieties and improved hybrids (cereals and vegetables), increased application of organic and inorganic fertilizers, massive infrastructure investments in irrigation and fertigation have justified increasing the yield potential of different crops. It has also reduced the time between planting and crop maturity and has managed to get two to three harvests in a crop year. In the future it is proposed that the increase in crop production will remain in the land designated for intensive agricultural production, but these systems in turn must meet strict environmental standards. Therefore, an agro-ecological intensification of cereal production systems will only be justified if taken into account food security, availability of land and water resources required for this purpose (Cassman, 1999).

The key to the issue will be to visualize and involve all elements as an integrated farm management, leading to good crop development and simultaneously to improve and maintain environmental quality and sustainability of the production system.

This paradigm shift poses great challenges; intensive farming is negatively correlated with biodiversity in farmlands (Smith *et al.*, 2013) since the use of inorganic fertilizers have contributed to generate environmental problems in soils and ecosystems, surface water and groundwater, nutritional poverty and induce loss of organic matter (Manlay *et al.*, 2007).

FAO (1998) proposed to make an integrated nutrient management in production systems through, improving productivity by balancing the use of inorganic fertilizer combined with organic sources, balance and efficiency of soil nutrient management and nutrients absorbed by plants. In this comprehensive management agronomists, soil scientists, ecologists and environmental authorities must collaborate (Snyder *et al.*, 2009). Since then, literature on strategies for intensive and sustainable agricultural management has increased in recent years, creating a need for a review at an international level to have a better view of the main contributions.

en años recientes haciendo necesario una revisión a nivel internacional con la idea de proporcionar un panorama general de las principales contribuciones.

Antecedentes de la producción agrícola mundial

La revolución verde, término usado a partir de la década de los 60's al periodo de producción agrícola, tuvo como objetivo incrementar la producción de alimentos mediante el uso y aplicación de fertilizantes inorgánicos en cultivos de variedades de alto rendimiento de arroz, trigo y maíz (Pinstrup-Anderson y Hazell, 1985). Esta revolución fue estrechamente apoyada a través de subsidios por gobiernos tanto de Europa como de Estados Unidos de América.

El enfoque todavía es vigente sobre todo en países en vías de desarrollo en donde el uso de fertilizantes inorgánicos se incrementará de 134 a 182 millones de toneladas para 2030, lo cual representa una tasa de crecimiento anual de 0.9% (FAO, 2000). La justificación es que el suministro mundial de alimentos se incrementará en 70% cuando la población alcance 9.2 mil millones en 2050 (Connor y Mínguez, 2012), con el consecuente deterioro y contaminación del medio ambiente. Asimismo, el crecimiento demográfico, la urbanización y la industrialización, competirán por espacios físicos en tierras destinadas al uso agrícola (Ericksona, 2013), por lo que será necesario disminuir los residuos contaminantes con la expansión de áreas destinadas a pastos apropiados, junto con la intensificación en áreas seleccionadas (Pfister *et al.*, 2011).

Ante esta problemática, se planteó un cambio de paradigma en la producción de alimentos en campo; es decir, alcanzar la seguridad alimentaria y a su vez conservar los agro-ecosistemas (Brady y Weil, 1999). La FAO (1998), propuso el manejo nutrimental integral, que consiste en la sustentabilidad del suelo para aportar nutrientes y uso racional en el manejo de las fuentes de los mismos. Este sistema pretende optimizar todos los aspectos del ciclo de nutrientes con la sincronía entre la demanda del cultivo y la liberación de estos por el suelo, reduciendo al mínimo las pérdidas por lixiviación, escorrentía, volatilización e inmovilización (Hossner y Jou, 2009).

El manejo integrado de nutrientes fue puesto en marcha con cuatro estrategias interrelacionadas como ejes principales, a saber: a) conservación y uso eficiente de nutrientes en el suelo nativo, mediante prácticas de conservación y reducción de pérdidas en los agro-ecosistemas; b) reciclaje del flujo de nutrientes orgánicos, a través de la incorporación de residuos

Background of global agriculture production

The Green Revolution, term used since late 60's to the period of agricultural production, aimed to increase food production through the use and application of inorganic fertilizers on crops of high yield varieties of rice, wheat and maize (Pinstrup-Anderson and Hazell, 1985). This revolution was closely supported through subsidies from the government in both Europe and the United States of America.

The approach is still valid, especially in developing countries where the use of inorganic fertilizers will increase from 134 to 182 million tons by 2030 countries, which represents an annual growth rate of 0.9% (FAO, 2000). The justification is that the world's food supply will increase 70% when the population reaches 9.2 billion in 2050 (Connor and Mínguez, 2012), with consequent damage and environmental pollution. Furthermore, population growth, urbanization and industrialization will compete for physical space on land destined for agricultural use (Ericksona, 2013), so it will be necessary to reduce polluting waste by expanding areas destined for pasture, along with the intensification in selected areas (Pfister *et al.*, 2011).

Faced with this problem, a paradigm shift was made in food production on field; i.e., achieve food security and in turn conserve the agro-ecosystems (Brady and Weil, 1999). FAO (1998) proposed the integrated nutrient management, consisting on the sustainability of the soil to provide nutrients and rational use in the management of the sources thereof. This system aims to optimize all aspects of the nutrient cycle, synchronizing between crop demand and the release of these on the soil, minimizing losses by leaching, runoff, volatilization and immobilization (Hossner and Jou, 2009).

The integrated nutrient management was launched with four interrelated strategies as main axes, namely: a) conservation and efficient use of nutrients in the native soil through conservation practices and reducing losses in the agro-ecosystems; b) recycling organic nutrient flow through the incorporation of plant residues; c) access to alternative sources of nitrogen by biological activity; and d) addition of inorganic fertilizer only in those soils with low fertility.

In conclusion, the nutritional management should be made in an efficient and practical manner to enable the availability and accessibility to nutrient sources for the plant, in order

vegetales; c) acceso a fuentes alternas de nitrógeno por actividad biológica; y d) adición de fertilizantes inorgánicos sólo en aquellos suelos con baja fertilidad.

En conclusión, el manejo nutrimental debe de realizarse de forma eficiente y práctica para activar la disponibilidad y accesibilidad de fuentes de nutrientes para la planta, con el fin de optimizar la productividad de los cultivos disminuir de manera drástica el uso de fertilizantes inorgánicos y por lo tanto, la contaminación de los suelos y el deterioro agro-ecológico. No obstante, todavía falta mucha investigación por realizar para poder alcanzar los objetivos propuestos por FAO (1998) hace ya más de 14 años. Cada uno de los factores involucrados en el manejo integrado de nutrientes se abordará individualmente a continuación.

Residuos de cosecha

Es ampliamente conocido que el incremento de materia orgánica en el suelo, a través de diferentes prácticas de manejo, aumentan los rendimientos del cultivo; sin embargo, no siempre se cuenta con fuente orgánica por lo que se recomienda incorporar residuos de cosecha. Esta práctica proporciona materia orgánica al suelo que es utilizada como fuente de energía por los micro-organismos, principales agentes de descomposición (Singh *et al.*, 2011) y liberación de nutrientes minerales al suelo. Los microorganismos al mejorar la estructura del suelo, aumentar la capacidad de retención del agua (Murray-Núñez *et al.*, 2011) y amplían la capacidad amortiguadora del suelo en cuanto a retención de cationes, reducción en la fijación de fósforo, reservorio de nutrientes secundarios y micronutrientes. En los suelos donde no se realiza esta práctica decrece la materia orgánica, que se refleja en bajos rendimientos, siendo necesario incorporar mayor cantidad de fertilizantes inorgánicos por unidad de superficie para mantener su potencial en 90% (Loveland y Webb, 2003).

Es importante indicar que la opción de incorporar los residuos vegetales al suelo debe ser evaluado con criterios de productividad, rentabilidad y sostenibilidad de la agricultura intensiva sin olvidar el impacto al agro-ecosistema (Manlay *et al.*, 2007). También debe coincidir con un enfoque de intensificación ecológica al cumplir con los estándares de calidad ambiental.

Rotación de cultivos

El consenso actual entre investigadores sobre la rotación de cultivos es el aumento en el rendimiento y el beneficio económico que genera a los agricultores, aunado a una

to optimize crop productivity and to drastically reduce the use of inorganic fertilizers and therefore, soil contamination and agro-ecological deterioration. However, there is still a lot of research to be done to achieve the objectives proposed by FAO (1998) more than 14 years. Each of the factors involved in the integrated nutrient management are addressed individually below.

Crop residues

It is widely known that the increase in organic matter in the soil, through different management practices, increase crop yields; however, not always have an organic source, so it is recommended to incorporate crop residues. This practice provides organic matter to soil that is used as an energy source for microorganisms, major agents of decomposition (Singh *et al.*, 2011) and release of mineral nutrients to the soil. Microorganisms improve soil structure, increase the capacity for water retention (Murray-Núñez *et al.*, 2011) and extend the buffer capacity of the soil in terms of cation retention, reduced phosphate fixation, secondary nutrient reservoir and micronutrients. In soils where this practice is not performed organic matter decreases, which is reflected in low yields, being necessary to incorporate more inorganic fertilizers per unit area to keep the potential at 90% (Loveland and Webb, 2003). It is important to note that the option of incorporating crop residues to the soil should be evaluated according to criteria of productivity, profitability and sustainability of intensive agriculture without forgetting the impact to the agro-ecosystem (Manlay *et al.*, 2007). It must also match with an approach of ecological intensification to meet environmental quality standards.

Crop rotation

The current consensus among researchers about crop rotation is the increase in yield and economic benefit generated to farmers, coupled to a sustained production. Crop rotation is characterized by a sequential system on cultivated land, management practices (Robson *et al.*, 2002), and rotation schedule which constitute around one or two main crops, followed by one or more legumes or other secondary crops such as energy.

In order to maximize crop productivity, in the 50's and 60's intensive monoculture agriculture depended heavily on external inputs, mainly on synthetic fertilizers and pesticides. However, no amount of these products applied to the system could completely offset the benefits

producción sostenida. La rotación de cultivos se caracteriza por un sistema secuencial sobre tierra cultivada, prácticas administrativas (Robson *et al.*, 2002), y programación de rotación que constituyen alrededor de uno o dos cultivos principales, seguido de una o más legumbres u otros cultivos secundarios como los energéticos.

Con el fin de maximizar la productividad de los cultivos, en la década de los 50's y 60's la agricultura de monocultivo intensivo dependió en gran medida de insumos externos principalmente en fertilizantes y pesticidas sintéticos. No obstante, ninguna cantidad de estos productos aplicados al sistema pudo compensar completamente los efectos beneficiosos que la rotación ofrecía, de ahí que se inició el interés de comprender las interacciones de los factores involucrados y explicar las causas del incremento en el rendimiento (Bullock, 1992).

En la actualidad, la rotación de cultivos es una práctica cultural generalizada en gran parte del mundo, que genera a largo plazo mejores condiciones agroecológicas y cambios en las propiedades edáficas (Brady y Weil, 1999). Una revisión exhaustiva sobre este tópico fue realizada por Zegada-Lizarazu y Monti (2011), quienes indican que este sistema de producción trae consigo desventajas como mayor nivel de organización y habilidad del agricultor; maquinaria y suministros agrícolas; preparación técnica y administrativa del productor en el manejo de varios cultivos, decremento en la disponibilidad y uso de tierras con cultivos de mayor rentabilidad y estricta secuencia y programación de cultivos.

A partir de estas particularidades del sistema productivo y la necesidad mundial de crear nuevas fuentes de energía fue propuesto un sistema a base de rotaciones entre especies cuidadosamente seleccionadas para la producción de alimentos con especies productoras de biocombustible, adaptadas potencialmente a diversas condiciones climáticas. Las especies seleccionadas para la producción de alimentos y biocombustibles deben considerar las siguientes características: duración (de periodo corto o largo); área cultivada (regular o irregular); secuencia de cultivos (cíclica o acíclica); uso de la tierra (continua o discontinua), y programación (abierto o cerrado). Robson *et al.* (2002) plantearon diferentes diseños y administración en la rotación de cultivos.

Finalmente, la práctica cultural es indispensable en un sistema de agricultura de producción intensiva, con cultivos que deben ser de la región con un mercado económicamente atractivo, donde se aproveche al máximo los fertilizantes inorgánicos e incentive la reserva y contenido de materia orgánica para

that crop rotation offered, from there, the interest in understanding the interactions of the factors involved and explain the causes of the increase in performance (Bullock, 1992).

Currently, crop rotation is a widespread cultural practice in the world, which produces better long-term agro ecological conditions and changes in soil properties (Brady and Weil, 1999). A comprehensive review on this topic was conducted by Zegada-Lizarazu and Monti (2011), who suggest that this production system brings disadvantages such as higher level of organization and ability of the farmer; agricultural machinery and supplies; technical and administrative preparation from the producer in management of different crops, decrease in the availability and use of land for more profitable crops and strict sequence and scheduling of crops.

From these characteristics of the production system and the global need for new energy sources was proposed a system based on rotations between species carefully selected for food production with biofuel producing species, adapted to different climatic conditions. Selected species for the production of food and biofuel must consider the following features: duration (short or long term); acreage (regular or irregular); crop sequence (cyclic or acyclic); land use (continuous or discontinuous), and programming (open or closed). Robson *et al.* (2002) proposed different designs and management in crop rotation.

Finally, cultural practice is essential in a system of intensive agriculture production, with crops that must be from the region with an economically attractive market, where they make the most of inorganic fertilizers and encourage keeping organic matter to conserve and promote the bio-structure of production. Also, the benefit that can be achieved will depend on the species used, i.e. legumes contribute to nitrogen fixation, grasses to organic matter in the soil by dry vegetative material (stubble) and perennial pastures act as restorers of the physical and biological soil by sequestering organic carbon (Franzluebbers *et al.*, 2013).

Some research regarding the rotation that were favorable in central Mexico are the relationship between corn-bean-sunflower-safflower or corn-safflower, in addition to the use of alfalfa as hedges and green manure in rotation with maize, which benefits nitrogen fixation and weed control (McVay *et al.*, 1989).

conservar y promover la bio-estructura de producción. También, el beneficio que se puede alcanzar dependerá de las especies utilizadas: por ejemplo las leguminosas contribuyen a la fijación de nitrógeno, las gramíneas al contenido de materia orgánica por medio del material vegetativo seco (rastrajo) y las pasturas perenes actúan como restauradoras de las condiciones físicas y biológicas del suelo al secuestrar el carbón orgánico (Franzluebersa *et al.*, 2013).

Algunas investigaciones referentes a la rotación que han resultado favorables en el centro de México son la relación entre maíz-frijol-girasol o maíz-cártamo, además de utilizar el cultivo de alfalfa como de cobertura y abono verde en rotaciones con maíz, la cual beneficia a la fijación de nitrógeno y el control de malezas (McVay *et al.*, 1989).

Ciclo de nutrientes

La intensificación agrícola (incremento de producción en espacio y tiempo) está asociada generalmente con la reducción en la capacidad productiva de las tierras agrícolas para proporcionar otras importantes funciones ecológicas como la retención de carbono (Oglea *et al.*, 2012), y el ciclo de nutrientes específicamente del nitrógeno (Widdison y Burt, 2013). Este tipo de prácticas agrícolas afectan directamente al secuestro y mineralización del carbón orgánico y la estabilización o alteración de la humedad, temperatura, aireación, pH y disponibilidad de nutrientes en el suelo (Sanford *et al.*, 2012). En consecuencia, tienen efectos negativos, sobre todo en la retención del agua y suministro de nutrientes importantes para la actividad biológica del suelo (Jahangir *et al.*, 2012).

La agricultura intensiva utiliza todos los medios para maximizar los rendimientos, por lo tanto también los beneficios. No obstante, las repercusiones son importantes al medio ambiente debido a que se sobreexplota a los recursos naturales (Figuroa-Viramontes *et al.*, 2011) y provoca contaminación por su uso excesivo (Moreau *et al.*, 2012). Numerosos estudios han demostrado que la lixiviación de nitrógeno en forma de $\text{NO}_3\text{-N}$ ha contaminado tanto las aguas superficiales como las aguas subterráneas (Syswerdaa *et al.*, 2012) y junto con el fósforo (P), están generando eutrofización en los cuerpos lacustres.

La lixiviación de nitrato se produce cuando su cantidad en la solución del suelo es mucho más alta que lo requerido por los cultivos o cuando no existe un cultivo de invierno de cobertura que los absorba (Sieling y Kage, 2006), lo cual provoca que en otoño-invierno y parte de la primavera se

Nutrient cycle

Agricultural intensification (increased production in space and time) is generally associated with a reduction in the productive capacity of agricultural land to provide other important ecological functions such as carbon sequestration (Oglea *et al.*, 2012), and the nutrient cycle specifically nitrogen (Widdison and Burt, 2013). This type of farming practices directly affect the sequestration and organic carbon mineralization and stabilization or alteration of moisture, temperature, aeration, pH and nutrient availability in the soil (Sanford *et al.*, 2012). Therefore there are negative effects, especially in water retention and nutrients supply that are important for the biological activity of the soil (Jahangir *et al.*, 2012).

Intensive agriculture uses all means to maximize yields, therefore also the benefits. However, the implications to the environment are important because it overexploits natural resources (Figuroa-Viramontes *et al.*, 2011) and causes pollution for overuse (Moreau *et al.*, 2012). Numerous studies have shown that the leaching of nitrogen as $\text{NO}_3\text{-N}$ has polluted both surface water and groundwater (Syswerdaa *et al.*, 2012) and along with phosphorus (P) are generating eutrophication in the lagoons.

Nitrate leaching occurs when the amount in the soil solution is much higher than the one required by the crops or where there is no winter cover crop to absorb it (Sieling and Kage, 2006), resulting in a mobilization towards the lower horizon, reaching water table in autumn-winter and part of spring. Cover crops in winter, especially if they have high demand of N like grains (corn and other cereals) absorb the excess of nitrates and other nutrients and produce large amounts of biomass (Syswerdaa *et al.*, 2012) which later are deposited on the ground. When spring starts, these crops are incorporated into the soil and decomposed by the action of microorganisms, releasing nitrogen and other nutrients. Several researchers conclude that cereal and tuber crops are suitable for this purpose.

Conservation tillage

The magnitude of the different tillage systems encompasses investment, no investment, deep, minimal, primary, reduced and secondary, and isolated or integrated. These are focused on the manipulation and direct intervention of the soil by agricultural implements, generating effects on soil properties and water quality (Logan and Lal,

movilice hacia los horizontes inferiores y alcance el manto freático. Cultivos de cobertura en invierno, especialmente si demandan altas cantidades de N como los granos (maíz y otros cereales) absorben el exceso de los nitratos y otros nutrientes y producen grandes cantidades de biomasa (Syswerda *et al.*, 2012) que posteriormente son depositados sobre el suelo. Al iniciar la época de primavera, estos cultivos son incorporados al suelo y al descomponerse por la acción de los microorganismos liberan el nitrógeno y otros nutrientes. Varios investigadores concluyen que los cultivos con cereales y tubérculos son adecuados para este fin.

Labranza de conservación

La magnitud de los distintos sistemas de labranza convencional abarca labores de inversión, no inversión, profunda, mínima, primaria, reducida y secundaria y en forma aislada o integrada. Estas se enfocan a la manipulación e intervención directa del suelo por implementos agrícolas, que generan efectos sobre las propiedades del suelo y la calidad del agua (Logan y Lal, 1991). No obstante, muchas de estas prácticas degradaron al suelo por lo que a partir de 1960 se introdujo un sistema de labranza denominado de conservación.

La labranza de conservación tiene varias modalidades en su aplicación, desde labranza mínima hasta la ausencia total de la misma (Holland, 2004) y se recomienda que se integren los residuos de cosecha (al menos en 30%) en la superficie del suelo, y reducción del uso de maquinaria y prácticas agrícolas culturales. Además, es necesaria la integración de las rotaciones y sistemas de cultivo, método de drenaje superficial y subterráneo, uso de tecnología de fertilizantes y alternativas de manejo integral de plagas.

Al reducir la alteración del suelo, esta práctica evita la degradación de las tierras causadas por la erosión hídrica o eólica (Verhulst *et al.*, 2010), mejora la productividad sostenible, a través de la agregación del suelo, distribución del tamaño de agregados y la estabilidad en diversos tipos de suelos y condiciones agroecológicas (Lichter *et al.*, 2008).

Respecto a las propiedades biológicas, la labranza de conservación incrementa diferentes poblaciones microbianas que provocan la oxidación de la materia orgánica y la mineralización del N. Toda esta actividad biótica se encuentra relacionada con el pH del suelo (Xiao *et al.*, 2013), propiedad química que involucra el contenido de materia orgánica y en consecuencia, la modificación de otras propiedades como retención de humedad, capacidad de intercambio catiónico y formación de agregados de origen biológico (Brady y Weil, 1999).

1991). However, many of these practices degraded the soil, so from 1960 a system called conservation tillage was introduced.

Conservation tillage has several modalities in its application, from minimum tillage to no tillage (Holland, 2004) and is recommended to integrate crop residues (at least 30%) in the surface and to reduce the use of agricultural machinery and cultural practices. Furthermore, the integration of rotations and cropping systems, surface and subsurface drainage, fertilizer use and alternatives for integrated pest management is necessary.

By reducing soil disturbance, prevents land degradation caused by water or wind erosion (Verhulst *et al.*, 2010), improves sustainable productivity through soil aggregation, aggregate size distribution and stability in different soil types and agro-ecological conditions (Lichter *et al.*, 2008).

Regarding the biological properties, conservation tillage increases different microbial populations that cause oxidation of organic matter and N mineralization. All this biotic activity is related to soil pH (Xiao *et al.*, 2013), chemistry property that involves organic matter content and consequently the modification of other properties such as moisture retention, cation exchange capacity and formation of aggregates of biological origin (Brady and Weil, 1999).

Currently, researches are aimed at determining factors and mechanisms for carbon sequestration through tillage system, soil quality or quantifying the rate of capture and destination of carbon by being recovered by grasslands (Ryals *et al.*, 2014).

However, it has been reported that conservation tillage has not always been successful (Holland, 2004). The non-removal of organic matter within the soil profile causes that nutrients such as N and K are not incorporated effectively and concentrate on the first 5 cm, which limits their availability (Gál *et al.*, 2007). It also has been found that causes the release and accelerated degradation of N, which has a negative impact on the cationic exchange capacity, structure and change in the relation C/N (Subbarao *et al.*, 2006). These results contrast with other studies that indicate the need to incorporate residues due to the high rate of mineralization (Tian *et al.*, 2010) and proposes to do more research in tropical environments, since rising temperatures increase the effects of eutrophic pollution of N in semi-natural ecosystems (Rowe *et al.*, 2012).

Actualmente, las investigaciones están encaminadas a determinar factores y mecanismos para el secuestro de carbono a través del sistema de labranza, calidad de suelo o cuantificación de la tasa de captura y destino del carbono al ser recuperados por pastizales (Ryals *et al.*, 2014).

Sin embargo, se ha reportado que la labranza de conservación no siempre ha tenido éxito (Holland, 2004). La no remoción de la materia orgánica dentro del perfil del suelo provoca que los nutrientes como N y K no se incorporen de manera efectiva y se concentren en los primeros 5 cm, lo que limita su disponibilidad (Gál *et al.*, 2007). También se ha encontrado que causa la liberación y degradación acelerada de N, que trae un impacto negativo en la capacidad de intercambio catiónico, estructura y cambio en la relación C/N (Subbarao *et al.*, 2006). Estos resultados contrastan con otras investigaciones que indican la necesidad de incorporar los residuos debido a la alta tasa de mineralización (Tian *et al.*, 2010) y proponen llevar a cabo más investigaciones en ambientes tropicales ya que el aumento de temperaturas incrementa los efectos de contaminación eutrófica de N en ecosistemas semi-naturales (Rowe *et al.*, 2012).

Disponibilidad de nutrientes

La labranza, el manejo de residuos y la rotación de cultivos tienen un impacto significativo en la distribución y transformación de la materia orgánica a través de la adición dentro del perfil, lo cual tiene efectos en el cambio de clima, matriz y finalmente la estructura del suelo (Balesdent *et al.*, 2000).

El aumento de la estratificación y disponibilidad de los nutrientes se incrementa con una mejor conservación del suelo. Alrededor de 20 nutrientes fueron localizados cerca de la superficie, sobre todo entre 0 - 7.5 cm de profundidad bajo el sistema de labranza cero en comparación con la labranza convencional. Esto significa que se debe de poner mayor atención a esta capa del suelo ya que ocurre la mayor densidad de raíces de los cultivos establecidos (Qin *et al.*, 2004).

El nitrógeno disponible en el suelo para las plantas depende de la tasa de mineralización del carbono; por ejemplo, en la labranza cero este elemento está generalmente asociado con una menor disponibilidad debido a la inmovilización de los residuos que quedan en la superficie (Bradford y Peterson, 2000).

En cuanto al fósforo, Hargrove *et al.* (1982) encontraron niveles altos de este elemento en el sistema de labranza de conservación. Esto se debe en gran parte a la mezcla

Availability of nutrients

Tillage, residue management and crop rotation have a significant impact on the distribution and transformation of organic matter through the addition within the profile, which has effects on climate change, matrix and finally soil structure (Balesdent *et al.*, 2000).

Increased stratification and nutrient availability increases with soil conservation. About 20 nutrients were located near the surface, especially between 0 - 7.5 cm depth under no-tillage compared with conventional tillage. This means that it has to pay more attention to this layer, since is were highest root density occurs on grow crops (Qin *et al.*, 2004).

Available nitrogen in the soil for plants depends on the rate of carbon mineralization; for example, on no-till farming, this element is generally associated with lower availability due to the immobilization of residues left on the surface (Bradford and Peterson, 2000).

As to phosphorus, Hargrove *et al.* (1982) found high levels of this element in the system of conservation tillage. This is due in large part to the reduced mixture of phosphate fertilizer with soil, resulting in a decrease and fixation thereof; also, can be an advantage when phosphorus is a limited nutrient or a threat when it is soluble in water (Verhulst *et al.*, 2010).

Moreover, conservation tillage maintains and increases the availability of potassium near the soil surface, where the roots of crops proliferate (Govaerts *et al.*, 2007) or also as tillage intensity decreases, vertical stratification of Calcium and Magnesium may also be affected by tillage or cultivation or not having any vertical difference.

Nutrient loading

The variation of nutrient load is defined as the mass of a chemical substance flowing in or out in a volume (soil) and is calculated as the chemical product (fertilizer) carried in a volume of water between the total concentrations of the dissolved product. In intensive production systems, its quantification in soil is the first step towards control (Barros *et al.*, 2012) and understanding groundwater pollution by nitrogen (Widdison and Burt, 2013) and phosphate leach (Schoumans *et al.*, 2013).

reducida de fertilizante fosfatados con el suelo, produciendo una disminución y fijación del mismo; además, puede ser una ventaja cuando el fósforo es un nutriente limitado o una amenaza cuando es soluble en agua (Verhulst *et al.*, 2010).

Por otra parte, la labranza de conservación mantiene e incrementa la disponibilidad de potasio, cerca de la superficie del suelo, donde las raíces de los cultivos proliferan (Govaerts *et al.*, 2007), o bien a medida que disminuye la intensidad de la labranza la estratificación vertical de Calcio y Magnesio también puede estar afectada por la labranza o el cultivo o no tener ninguna diferencia vertical.

Carga de nutrientes del suelo

Las variaciones de la carga de nutrientes esta definida como la masa de una sustancia química que entra o sale en un volumen (suelo) y se calcula como el producto químico (fertilizante) transportado en un volumen de agua entre la concentración total del producto disuelto. En sistemas de producción intensiva su cuantificación en el suelo es el primer paso hacia el control (Barros *et al.*, 2012), y comprensión de la contaminación de aguas subterráneas por lixiviados nitrogenados (Widdison y Burt, 2013) y fosfatados (Schoumans *et al.*, 2013).

El balance de la carga de nutrientes está influenciada por factores naturales o inducidos (Tripathi, 2009). El impacto de la deposición de N en ambos altera la diversidad de especies de plantas, incluyendo al arbóreo, sotobosque y criptógamas, la diversidad de microorganismos y la diversidad animal, considerando la fauna subterránea y herbívoros sobre el suelo (Xiankai, 2008).

Los factores naturales que están involucrados en el balance nutrimental son: el clima, las cuencas hidrográficas (Neala y Heathwaiteb, 2005), el suelo (Ziadia *et al.*, 2013) y la topografía. Los factores inducidos o artificiales son la labranza (Morari *et al.*, 2012), la cobertura del suelo (Singh *et al.*, 2005), la fertilización considerando: tipo de fertilizante orgánico e inorgánico, ubicación y momento de aplicación (Bhattacharyya *et al.*, 2008) y el riego, definiéndose cantidad, frecuencia y método de aplicación (Stowe *et al.*, 2010). El balance nutrimental que puede soportar el suelo está determinado de forma indirecta o directa (Khanna y Raison, 2013). La primera, consiste en realizar mediciones de la carga mediante el modelo de flujo (Kyllmar *et al.*, 2005) y balance entre ellos. Este método valora el impacto de lixiviación de nutrientes y calidad del agua a nivel de cuencas hidrográficas y es empleado para establecer políticas agro-ambientales.

The balance of nutrient loading is influenced by natural or induced factors (Tripathi, 2009). The impact of N deposition alters both the diversity of plant species, including the tree, understory and cryptogams, microorganisms and animal diversity, considering subterranean fauna and herbivores on the ground (Xiankai, 2008).

Natural factors involved in nutrient balance are: climate, watersheds (Neala and Heathwaiteb, 2005), soil (Ziadia *et al.*, 2013) and topography. The induced or artificial factors are tillage (Morari *et al.*, 2012), land cover (Singh *et al.*, 2005), fertilization considering: type of organic and inorganic fertilizer, location and time of application (Bhattacharyya *et al.*, 2008) and irrigation, defining amount, frequency and method of application (Stowe *et al.*, 2010). The nutritional balance that soil can withstand is determined indirectly or directly (Khanna and Raison, 2013). The first involves measurements of load through flow model (Kyllmar *et al.*, 2005) and balance between them. This method assesses the impact of nutrient leaching and water quality at watershed level and is used to establish agro-environmental policies.

Indirect models aim to characterize and quantify nutrient transport, retention and transformation using empirical equations describing a physical system. There are many models of nutrient loss for both N and P (Cherry *et al.*, 2008), ranging in complexity from simple empirical applications to complex global models. An example of the indirect model is used to determine the concentration of N leaching in farmlands with intensive production, called mood. This model is based on equilibrium processes and storage of available soil nutrients (Kyllmar *et al.*, 2005) and quantifies the difference between N contributed to soil and output by percolation from the intensive agricultural system.

Moreover, the direct method consist in placing traps of resin (lysimeters) to quantify the loss of $\text{NO}_3\text{-N}$ by leaching from the soil surface to shallow groundwater, while elucidates sources of loss of nitrogen in a given time, by the flow of water and physical, chemical and biological characteristics, leading to the understanding of unconfined aquifer pollution (Goss *et al.*, 2010).

The main component is an ion exchange resin (nutrient capture filter, anions and cations) that is placed before start monitoring leaching below the root system of the crop. When water starts to flow through the soil horizons, nutrients leached are intercepted by the trap of ion exchange, which when recovered the cores of resin are taken to the laboratory to be extracted and quantified (Abdou and Flury, 2004).

Los modelos indirectos tienen el objetivo de caracterizar y cuantificar el transporte de nutrientes, la retención y la transformación usando ecuaciones empíricas que describen un sistema físico. Existen muchos modelos de pérdida de nutrientes tanto para N como para P (Cherry *et al.*, 2008), que varían en complejidad desde simples aplicaciones empíricas hasta complejos modelos globales. Un ejemplo del modelo indirecto es utilizado para determinar la concentración de lixiviación de N en tierras agrícolas con producción intensiva, denominado ánimo. Este modelo se basa en procesos de equilibrio y almacenamiento de nutrientes disponibles por el suelo (Kyllmar *et al.*, 2005) y cuantifica la diferencia entre el N aportado al suelo y la salida por percolación del sistema agrícola intensivo.

Por otra parte, el método directo consiste en colocar trampas de resina (lisímetros), para cuantificar la pérdida de $\text{NO}_3\text{-N}$ por lixiviación desde la superficie del suelo hacia aguas subterráneas poco profundas, al mismo tiempo dilucida las fuentes de pérdidas de nitrógeno en un momento dado, mediante el flujo de agua y características físicas, químicas y biológicas, lo que lleva a la comprensión de la contaminación de acuíferos no confinados (Goss *et al.*, 2010).

El componente principal es una resina de intercambio de iones (filtro de captura de nutrientes, aniones y cationes) que se coloca antes de iniciar el monitoreo de lixiviación por debajo del sistema radicular del cultivo. Cuando inicia el flujo de agua a través de los horizontes del suelo, los nutrientes lixiviados son interceptados por la trampa de intercambio iónico, que al ser recuperado los núcleos de resina son llevados al laboratorio para ser extraídos y cuantificados (Abdou y Flury, 2004).

Valores cuantitativos reportados en diferentes condiciones climáticas de lixiviados de N son de $\pm 65\%$ (Krysanova y Haberlandt, 2002), en prácticas culturales de rotación de cultivos entre ± 20 y 25% en suelos agrícolas en descanso en $\pm 48\%$ (Schmidt *et al.*, 2008), y en suelos con aplicación de fertilizantes de $\pm 40\%$.

Debido a la variabilidad en los resultados de lixiviación con N-localizado, Gazula (2009) menciona que las mejores predicciones de N total lixiviado son estimadas en campo para un sistema de cultivo específico, tipo y sitio del suelo con muy pocas estimaciones de la carga de nutrientes provenientes de suelos destinados a la producción agrícola. Esto se debe a la falta de consistencia de los resultados generados por el método de medición en campo que no

Quantitative values reported under different climatic conditions of N leached are $\pm 65\%$ (Krysanova and Haberlandt, 2002), in cultural practices of crop rotation between ± 20 and 25% , in agricultural soils at rest $\pm 48\%$ (Schmidt *et al.*, 2008), and in soils with fertilizer application of $\pm 40\%$.

Due to the variability in results of leaching with N-localized, Gazula (2009) mention that the best predictions of the total N leaching are estimated in the field for a specific crop system, type and soil site with little estimates of nutrients load from soils designated for agricultural production. This is due to the lack of consistency of the results generated by the method of measurement in the field that do not have specific information on the economic impact of fertigation in vegetable production and use of padding in the production system.

Water in intensive agriculture

Food production can be increased and meet global food safety only if irrigated areas expand or intensified irrigation. Based on the above, a model to estimate the efficient use of water resources (SWAT); for its acronym in English by solid physical basis has been proposed as a tool for evaluation of soil and water from large watersheds under intensive production. This model involves parameters such as runoff, percolation, water flow, nutrient loading, pesticide pollution, climate, crop and farm management (Arnold *et al.*, 1998).

Furthermore, the term water footprint has been proposed to account gains and losses in the use of water, which refers to the total volume used during the production and consumption of goods and services. It also quantifies direct water consumption by humans, allowing quantify total water consumed throughout the global supply chain (Yu *et al.*, 2010).

Zhao *et al.* (2009) stated that the limitations of water resources are and will be an imminent threat to sustainability of intensive agriculture systems. The sustainability of the systems in the future will be forced to maintain the demand for food under adverse conditions, which means having a better use and more sophisticated methods of irrigation and nutrition. Investing in pressurized systems creates economic savings compared to furrow or border irrigation (Hillel, 2008). The adoption of well-designed and managed systems are focused on terms of water saving, economic returns to sustainable profitability of crops, and the recovery of investment (Rodrigues *et al.*, 2013).

tiene información específica sobre el impacto económico de la fertirrigación en la producción de hortalizas y el uso de acolchonado en el sistema productivo.

El agua en la producción intensiva agrícola

La producción de alimentos puede incrementarse y cubrir la seguridad alimentaria mundial sólo si las zonas de regadío se expanden o el riego se intensifica. Con base a lo anterior, un modelo para estimar el uso eficiente del recurso hídrico (SWAT); por sus siglas en inglés mediante una base física continua se ha propuesto como herramienta de evaluación de suelo y agua de las grandes cuencas agrícolas bajo producción intensiva. Este modelo involucra parámetros como: escorrentía, percolación, flujo del agua, carga de nutrientes, contaminación por pesticidas, clima, cultivo y manejo agrícola (Arnold *et al.*, 1998).

Además, el término como huella hídrica se ha propuesto para contabilizar las ganancias y las pérdidas en el uso de agua, el cual hace referencia al volumen total utilizado durante la producción y consumo de bienes y servicios. También cuantifica el consumo directo de agua por los seres humanos, permitiendo cuantificar el total de agua consumida a lo largo de la cadena de suministro global (Yu *et al.*, 2010).

Zhao *et al.* (2009) mencionan que las limitaciones del recurso hídrico son y serán un riesgo eminente para la sostenibilidad de los sistemas productivos agrícolas intensivos. La sustentabilidad de los sistemas en el futuro estará obligada a mantener la demanda de alimentos bajo condiciones adversas, lo que implica contar con un mejor uso y métodos más sofisticados de riego y nutrición.

Invertir en sistemas presurizados origina ahorros económicos en comparación con riegos por surcos o melgas (Hillel, 2008). La adopción de sistemas bien diseñados y administrados están enfocados a términos de ahorro de agua, ganancias económicas con la rentabilidad sostenible de cultivos, y la recuperación de los costos de inversión (Rodrigues *et al.*, 2013).

El uso excesivo percibido o real del agua en forma de riegos se reduce con sistemas localizados (micro-aspersión, goteo o cintilla) directamente en la zona radicular. Estos sistemas altamente eficientes son necesarios para lograr un manejo integral de nutrientes en la producción intensiva al cubrir las necesidades hídricas y nutrimentales por medio de fertirriego

The perceived or actual excessive use of water for irrigation decreases with localized systems (micro-sprinkler, drip) directly into the root zone. These highly efficient systems are necessary to achieve a comprehensive nutrient management in intensive agriculture to cover water and nutritional needs through fertigation in each phenological stage of the plant; an increase in the efficiency of application prevents mineralization and leaching of the main elements of nutrition in the plant (Kijne *et al.*, 2009).

Moreover, in semiarid environments, without risk and high rain intensity, low frequency, erratic and uneven distribution, it is difficult to determine the dose of N to apply, requirement to achieve high yields (Rusan *et al.*, 2005). This variation in the period of precipitation has a strong impact on the yield and use of N supplied, making the potential for excessive or deficient N fertilization cannot be determined.

Use of precision agriculture

Precision agriculture dates from 1980. Seelan *et al.* (2003) indicate that this technology is a production system that promotes management practices in field variables, according to the site conditions. Since it is based on tools and sources of information provided by modern technologies such as global positioning systems (GPS), geographic information systems (GIS), monitoring devices, soil sensors, plants and pests, and remote sensing technology; however, accurate information about spatial variability in the field is very important for precision agriculture, which currently lacks practical efficiency.

The factors affecting this type of farming, to mention some are: crop yield, soil properties, nutrient loading, volume or crop canopy and biomass, water content and pest conditions (disease, weeds and insects) (Lee *et al.*, 2010).

When systems are based on sensors, require training plots without nutritional deficit from the crop in the field to serve as a reference to other plots. By delaying the application of a portion of fertilizer, normally used; the information from the sensor could be used to determine if it was really necessary. This approach allows to adjust, at least part of the season, the fertilization (N, P, K) and to determine the time of release of N from the soil organic matter.

en cada etapa fenológica de la planta, con incremento en la eficiencia de aplicación evita la mineralización y lixiviación de los principales elementos constitutivos de la nutrición en la planta (Kijne *et al.*, 2009).

Por otra parte, en ambientes semiáridos, sin riegos y lluvia de alta intensidad, poca frecuencia, distribución errática y de forma desigual, es difícil determinar la dosis de N a aplicar, requisito para lograr altos rendimientos (Rusan *et al.*, 2005). Esta variación, en el período de precipitación, tiene un fuerte impacto sobre el rendimiento y la utilización de N suministrado, haciendo que el potencial de fertilización excesiva o deficiente con N no pueda ser determinado.

Uso de tecnología de precisión

La agricultura de precisión data desde 1980. Seelan *et al.* (2003) señalan que esta tecnología es un sistema de producción que promueve prácticas de administración de variables en campo, de acuerdo con las condiciones del sitio. Ya que se basa en herramientas y fuentes de información proporcionadas por las tecnologías modernas como el posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG), dispositivos de vigilancia, sensores de suelo, plantas y plagas y tecnología de teledetección. Sin embargo, la información precisa acerca de la variabilidad espacial en campo es muy importante para la agricultura de precisión que en la actualidad carece de eficiencia práctica.

Los factores que afectan a este tipo de agricultura por mencionarse algunos son: el rendimiento del cultivo, las propiedades del suelo, la carga de nutrientes, el volumen o dosel del cultivo y la biomasa, el contenido de agua y las condiciones de plagas (enfermedades, arvenses e insectos) (Lee *et al.*, 2010).

Cuando los sistemas están basados en sensores requieren parcelas de entrenamiento sin déficit nutrimental del cultivo en campo, para servir como una referencia a otras parcelas. Al retrasar la aplicación de una porción de fertilizante normalmente utilizado, la información del sensor podrá ser usada para determinar si fue realmente necesario. Este enfoque permite ajustar, al menos en una parte de la temporada, la fertilización (N, P, K), así como determinar la época de liberación de N por la materia orgánica del suelo.

Los agricultores están utilizando estos avances tecnológicos para maximizar los beneficios económicos y ambientales, al especificar y redefinir las dosis recomendadas de nutrientes

Farmers are using these technological advances to maximize economic and environmental benefits, by specifying and refining the recommended doses of nutrients through models and specific site conditions. Moreover, granting a nutritional corrective approach to programming, implementation and verification of fertilization (Sudduth *et al.*, 1997).

Ladha *et al.* (2005) mentioned that these tools provide thematic maps of soil distribution and spatial variability within the area of interest, moisture distribution maps and field maps inter-connected to yield monitoring, variable rate seeding and agrochemical applicators under precision agriculture programs. However, the technique requires local knowledge of the variable (yield, nutrition, humidity, and soil type) involved in the field to establish plots of recognition and verification of productivity and fertilization that denotes the increase compared with treatments of conventional application. However, one of the limitations in the use is to consider the homogeneity of the variables involved or the degree of heterogeneity to recover the cost associated with the specific site.

Fertilization based on optical sensors is used to detect and estimate the performance and increase them in more than 15%, or to determine the amounts of fertilizer (N) in plots with different managements and establish autonomous agricultural vehicles to detect plant diseases in real time (Sankaran *et al.*, 2010).

The economic justification for the use of this technology is its respective variable rate of application; however, due to weather conditions, these techniques are unpredictable to be widely used. In addition, the potential benefits of precision agriculture remain complex and not commercially applicable (Pierce and Nowak, 1999).

Conclusions

Integrated nutrient management in food production is a new approach that ensures food safety, conservation and sustainability of natural resources; however, it is necessary to understand the interaction between crops, growth, soil microclimate and its relationship with nutrient demands in combination with socio-economic factors to carry out an intensive and sustainable agriculture.

End of the English version



mediante modelos y condiciones específicas de sitio. Además, de otorgar un enfoque correctivo nutrimental hasta la programación, aplicación y verificación de la fertilización (Sudduth *et al.*, 1997).

Ladha *et al.* (2005) mencionan que estas herramientas proporcionan mapas temáticos de suelos con distribución y variabilidad espacial dentro del área de interés, mapas de distribución de humedad y mapas de campo inter-conectados a monitores de rendimiento, tipo de sembradoras de tasa variable y aplicadores de agroquímicos bajo programas de agricultura de precisión. No obstante, la técnica requiere del conocimiento local de las variables (rendimientos, nutrición, humedad, tipo de suelo) implicadas en campo para establecer parcelas de reconocimiento y de comprobación de productividad y fertilización, que denoten el incremento en comparación con los tratamientos de aplicación convencionales. No obstante, una de las limitaciones en el uso es considerar la homogeneidad de las variables involucradas o el grado de heterogeneidad para recuperar el costo asociado con el sitio específico.

La fertilización con base en sensores ópticos es utilizada para detectar y estimar el rendimiento e incrementarlos en más de 15%, o bien determinar las cantidades de fertilizantes (N) en parcelas con diferentes manejos y establecer vehículos agrícolas autónomos para la detección de enfermedades de las plantas en tiempo real (Sankaran *et al.*, 2010).

La justificación económica para el uso de esta tecnología es su respectiva tasa variable de aplicación; sin embargo, debido principalmente a las condiciones climáticas estas técnicas son impredecibles para ser ampliamente utilizadas. Además, los beneficios potenciales de la agricultura de precisión siguen siendo complejos y no comercialmente aplicables (Pierce y Nowak, 1999).

Conclusión

El manejo integrado de nutrientes para la producción de alimentos es un nuevo enfoque que garantiza la seguridad alimentaria, la conservación y la sustentabilidad de los recursos naturales; sin embargo, es necesario la comprensión de la interacción entre cultivos, crecimiento, microclima del suelo y su relación con las demandas de nutrientes en combinación con factores socio-económicos para llevar a cabo una agricultura intensiva, sustentable y sostenible.

Literatura citada

- Abdou, H. M. and Flury, M. 2004. Simulation of water flow and solute transport in free-drainage lysimeters and field soils with heterogeneous structures. *Europ. J. Soil Sci.* 55: 229-241.
- Arnold, J. G.; Srinivasan, R.; Mutiah, R. S. and Williams, J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I. Model Development. *J. Am Water Res. Ass.* 34(1):73-89.
- Barros, R.; Isidoro, D. and Aragüés, R. 2012. Irrigation management, nitrogen fertilization and nitrogen losses in the return flows of La Violada irrigation district. *Agric. Ecosyst. Environ.* 155:161-171.
- Bhattacharyya, R.; Kundu, S.; Prakash, V. and Gupta, S. A. 2008. Sustainability under combined application of mineral and organic fertilizers in a rainfed soybean- wheat system of the Indian Himalayas. *Eur. J. Agro.* 28(1):33-46.
- Bradford, J. M. and Peterson, G. A. 2000. Conservation tillage. *In: handbook of soil science.* (Ed.). Sumner, M. E. G247-G269. Boca Raton, Florida, USA: CRC. In Press. 10 p.
- Brady, N. C. and Weil, R. R. 1999. The nature and properties of soils. 12 (Ed.). Editorial Prentice Hall. 880 p.
- Cherry, K. A.; Shepherd, M.; Withers, P. J. A. and Mooney, S. J. 2008. Assessing the effectiveness of actions to mitigate nutrient loss from agriculture: A review of methods. *Sci. T. Environ.* 406:(1):2-3.
- FAO. 1998. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Guide to efficient plant nutrient management, Rome, Italy. 1-18 pp.
- FAO. 2000. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Agriculture: towards 2015/2030. Rome, Italy. 97 p.
- Figueroa-Viramontes, U.; Delgado, J. A.; Cueto-Wong, J. A.; Núñez-Hernández, G.; Reta-Sánchez, D. G. and Barbarick, K. A. 2011. A new Nitrogen Index to evaluate nitrogen losses in intensive forage systems in Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ.* 142(3-4):352-364.
- Gál, A.; Vyn, T. J.; Michéli, E.; Klavivko, E. J. and McFee, W. W. 2007. Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths. *Soil Till. Res.* 96:42-51.
- Gazula, A. 2009. Impact of irrigation and nutrient management programs on fruit yield, nitrogen Load, and crop value fresh market tomato grown with plasticulture in the best management practices. Thesis Doctor of Philosophy. University of Florida. 112 p.
- Goss, M. J.; Ehlers, M. J. W. and Unc, A. 2010. The role of lysimeters in the development of our understanding of processes in the vadose zone relevant to contamination of groundwater aquifers. *Phys. Chemistry Earth.* 35:913-926.
- Govaerts, B.; Sayre, K. D.; Lichter, K.; Dendooven, L. and Deckers, J. 2007. Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems. *Plant Soil.* 291:39-54.
- Hargrove, W. L.; Reid, J. T.; Touchton, J. T. and Gallaher, R. N. 1982. Influence of tillage practices on the fertility status of an acid soil double-cropped to wheat and soybeans. *Agr. J.* 74:684-687.
- Hillel, D. 2008. Forty years of drip irrigation: reviewing the past, prospects for the future. *CSA News American Society of Agronomy, Madison, Wisc.* 53(9):2-7.

- Holland, J. M. 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agric. Ecosyst. Environ.* 103(1):1-25.
- Hossner, L. R. and Jou, A. S. R. 2009. Soil nutrient management for sustained food crop production in upland farming systems in the tropics. Soil and Crop Sciences Department, Tennessee. USA. 1-18 pp.
- Jahangir, M. M. R.; Khalil, M.; Johnston, P.; Cárdenas, L. M.; Hatch, D. J.; Butler, M.; Barrett, E. M.; O'flaherty, V. and Richards, K. G. 2012. Denitrification potential in subsoils: a mechanism to reduce nitrate leaching to groundwater. *Agric. Ecosyst. Environ.* 147:13-23.
- Khanna, P. K. and Raison, R. J. 2013. In situ core methods for estimating soil mineral-N fluxes: Re-evaluation based on 25 years of application and experience. *Soil Biol. Biochem.* 64:203-210.
- Kijne, J.; Barron, J.; Hoff, H.; Rockstrom, J.; Karlberg, L.; Gowing, J.; Wani, S. P. and Wichelns, D. 2009. Opportunities to increase water productivity in agriculture with special reference to Africa and South Asia. Stockholm Environment Institute. Project Report. 1-35 pp.
- Krysanova, V. and Haberlandt, U. 2002. Assessment of nitrogen leaching from arable land in large river basins part I. Simulation experiments using a process-based model. *Ecol. Modelling* 150(3):255-275.
- Kyllmar, K.; Martensson, K. and Johnsson, H. 2005. Model-based coefficient method for calculation of N leaching from agricultural fields applied to small catchments and the effects of leaching reducing measures. *J. Hydrol.* 304:343-354.
- Ladha, J. K.; Pathak, H.; Krupnik, T. J.; Six, J. and Van Kessel, C. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Ad. in Agro.* 87:85-156
- Lee, W. S.; Alchanatis, V.; Yang, C.; Hirafujid, M.; Moshou, D. and Li, C. 2010. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture.* 74:2-33.
- Lichter, K.; Govaerts, B.; Six, J.; Sayre, K. D.; Deckers, J. and Dendooven, L. 2008. Aggregation and C and N contents of soil organic matter fractions in a permanent raised-bed planting system in the Highlands of Central Mexico. *Plant Soil* 305:237-252.
- Logan, T. J. and Lal, R. W. 1991. Tillage systems and soil properties in North America. *Soil Till. Res.* 20(2-4):241-270.
- Manlay, R. J.; Christian Feller, C. and Swift, M. J. 2007. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 119:217-233.
- McVay, K. A.; Radcliff, D. E. and Hargrove, W. L. 1998. Winter legume effects on soil properties and N fertilizer requirements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:1856-1862.
- Morari, F.; Lugato, E.; Polese, R.; Berti, A. and Giardini L. 2012. Nitrate concentrations in groundwater under contrasting agricultural management practices in the low plains of Italy. *Agric. Ecosyst. Environ.* 147:47-56.
- Murray-Núñez, R. M.; Bojórquez-Serrano, J. I.; Hernández-Jiménez, A.; Rosco-Benítez, M. G.; García-Paredes, J. D.; Gómez-Aguilar, R.; Ontiveros-Guerrera, H. M. and Aguirre-Ortega, J. 2011. Effect of organic matter on soil physical properties in an agroforestry system in the northern coastal plain of Nayarit Mexico. *Biociencias* 1:27-35.
- Neala, C. and Heathwaite, A. L. 2005. Nutrient mobility within river basins: a European perspective. *J. Hydro.* 304:477-490.
- Oglea, S. M.; Swana, A. and Paustian, K. 2012. No-till management impacts on crop productivity, carbon input and soil carbon sequestration. *Agric. Ecosyst. Environ.* 149:37-49.
- Pierce, F. J. and Nowak, P. 1999. Aspects of precision agriculture. *Adv. Agro.* 67:1-85.
- Pinstrup-Anderson, P. and Hazell, P. B. R. 1985. The impact of the green revolution and prospects for the future. *Food Rev. Int.* 1:1-25
- Qin, R. J.; Stamp, P. and Richner, W. 2004. Impact of tillage on root systems of winter wheat. *Agr. J.* 96:1523-1530.
- Rodrigues, G. C.; Paredes, P.; Goncalves, J. M. P.; Alves, I. and Pereira, L. S. 2013. Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: ranking for water saving vs. farm economic returns. *Agric. Water Managem.* 126:85-96.
- Rusan, M. J. M.; Battikhi, A. and Zuraiqi, S. 2005. Enhancement of nitrogen and water use efficiency by optimizing the combined management of soil crop and nitrogen. Nutrient and water management practices for increasing crop production in rainfed arid semiarid areas. Proceedings of a coordinated research project. IAEA/TECDOC/1468. 228 p.
- Ryals, R.; Kaiser, M.; Torn, M. S.; Berhe, A. A. and Silver, W. L. 2014. Impacts of organic matter amendments on carbon and nitrogen dynamics in grassland soils. *Soil Biol. Biochem.* 68:52-61.
- Sankaran, S.; Mishra, A.; Ehsania, R. and Davis, C. 2010. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Comp. Electro. Agri.* 72:1-13.
- Sanford, G. R.; Posner, J. L.; Jackson, R. D.; Kucharik, C. J.; Hedtcke, J. L. and Lin, T. L. 2012. *Agric. Ecosyst. Environ.* 162:68-76.
- Schmidt, T. G.; Franko, U. and Meissner, R. 2008. Uncertainties in large-scale analysis of agricultural land use - a case study for simulation of nitrate leaching. *Ecol. Modelling.* 217(1-2):174-180.
- Seelan, S. K.; Laguetta, S.; Casady, S. M. and Seielstad, G. A. 2003. Remote sensing applications for precision agriculture: a learning community approach. *Re. Sen. Environ.* 88:157-169.
- Sieling K. and Kage H. 2006. N balance as an indicator of N leaching in an oilseed rape- winter wheat- winter barley rotation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 115:261-269.
- Singh, J. S.; Pandey, V. C. and Singh, D. P. 2011. Efficient soil microorganisms: a new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140:339-353.
- Singh, Y.; Singh, B. and Timsina J. 2005. Crop residue management for nutrient cycling and improving soil productivity in rice-based cropping systems in the tropics. *Adv. in Agro.* 85:269-407.
- Smith, F. P.; Probera, S. M.; Houseb, A. P. N. and McIntyre, S. 2013. Maximizing retention of native biodiversity in Australian agricultural. Landscapes- the 10:20:40:30 guidelines. *Agric. Ecosyst. Environ.* 166:35-45.
- Snyder, C. S.; Bruulsema, T. W.; Jensenc, T. L. and Fixen, P. E. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agric. Ecosyst. Environ.* 133:247-266.
- Stowe, D. C.; Lamhamedi, M. S.; Carles, S.; Fecteau, B.; Margolis, H. A.; Renaud, M. and Bernier, P. Y. 2010. Managing irrigation to reduce nutrient leaching in containerized white spruce seedling production. *New Forests.* 40:185-204.
- Subbarao, G. V.; Itoa, O.; Sahrabat, K. L.; Berryc, W. L.; Nakaharad, K.; Ishikawad; Watanabed, T.; Suenagae, K.; Rondonf, M. and Rao, I. M. 2006. Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems- challenges and opportunities. *Crit. Rev. Plant Sci.* 25:303-335.

- Sudduth, K. A.; Hummel, J. W. and Birrell, S. J. 1997. Sensors for site-specific management. *In*: 'the state of site-specific management for agriculture'. Pierce, F. J. and Sadler, E. J. (Eds.), ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. 183-210 pp.
- Syswerda, S. P.; Bassoa, B.; Hamiltona, S. K.; Tausiga, J. B. and Robertsona, G. P. 2012. Long-term nitrate loss along an agricultural intensity gradient in the Upper Midwest USA. *Agric. Ecosyst. Environ.* 149:10-19.
- Tian, L.; Dell, E. and Shi, W. 2010. Chemical composition of dissolved organic matter in agroecosystems: correlations with soil enzyme activity and carbon and nitrogen mineralization. *Ap. Soil Ecol.* 46:426-435.
- Tripathi, S. K. 2009. Human influences on mobility of nitrogen in the environment: needs for research and management. *Acta Ecológica Sinica.* 29:130-135.
- Verhulst, N.; Govaerts, B.; Verachtert, E.; Castellanos-Navarrete, A.; Mezzalama, M.; Wall, P.; Deckers, J. and Sayre, K. D. 2010. Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems? *In*: Lal, R. and Stewart, B. A. (Eds.). *Advances in soil science: food security and soil quality.* 1-36 pp.
- Widdison, P. E. and Burt, T. P. 2013. Nitrogen cycle. *encyclopedia of ecology. Earth Systems and Environmental Sciences.* 2526-2533 p.
- Xiankai, L.; Jiangming, M. and Shaofeng, D. 2008. Effects of nitrogen deposition on forest biodiversity. *Acta Ecologica Sinica.* 28(11):5532-5548.
- Xiao, K.; Xua J.; Tang, C.; Zhangc, J. and Brookes, P. C. 2013. Differences in carbon and nitrogen mineralization in soils of differing initial pH induced by electrokinesis and receiving crop residue amendments. *Soil Biol. Bioch.* 67:70-84.
- Yu, Y.; Hubacek, K.; Feng, K. and Guan, D. 2010. Assessing regional and global water footprints for the UK. *Ecol. Econ.* 69:140-1147.
- Zhang, F.; Cui Z.; Fan, M.; Zhang, W. and Chen, X. 2011. Integrated soil crop system management: reducing environment risk while increasing crop productivity and improving nutrient use efficiency in China. *J. Environ. Quality.* 40(4):1051-7.
- Zhao, L.; Wu, L.; Li, Y.; Lu, X.; Z. hu and Uphoff, N. 2009. Influence of the system of rice intensification on rice yield and nitrogen and water use efficiency with different N application rates. *Expl. Agric.* 45:275-286.
- Ziadia, N.; Athyna N.; Nyiranezac C. J. and Nolin, M. C. 2013. Across a landscape, soil texture controls the optimum rate of N fertilizer for maize production. *Field Crops Res.* 148:78-85.